

Verringerung von DC-Magnetfeldern bei Straßenbahnen

Frank van Overbeeke, Rotterdam (NL), Bas Gravendeel, Schiedam (NL),
Pieter Kruit und Lou van der Sluis, Delft (NL)

Eine neue Straßenbahnlinie in Delft durchquert das Gelände der Technischen Universität. Die üblichen von der Gleichstromversorgung erzeugten Magnetfelder stören empfindliche Messgeräte in den Laboren. Durch ein alternatives Energieversorgungskonzept wird das DC-Magnetfeld auf ein Zehntel reduziert. Eine wichtige Aufgabe dabei ist, die Zuverlässigkeit der Traktionsanlage nicht zu beeinträchtigen.

Reduction of d.c. magnetic fields from tramways

A new tram line in Delft crosses the campus of the University of Technology. The magnetic field normally associated with the DC traction supply disturbs sensitive equipment in the laboratories of the University. An alternative traction supply concept reduces the DC magnetic field emission by a factor 10. An important task is to maintain the usual reliability of the traction supply.

Réduction des champs magnétiques DC des tramways

Une nouvelle ligne de tram à Delft traverse le campus de l'Université Polytechnique. Le champ magnétique normalement associé à l'alimentation de traction DC perturbe les équipements sensibles dans les laboratoires de l'Université. Un concept alternatif d'alimentation de traction réduit le champ magnétique DC émis par un facteur 10. Une tâche importante est de maintenir la fiabilité habituel de l'alimentation.

1 Einführung

Im südlichen Teil des Geländes der Technischen Universität Delft wird ein neues Geschäftsviertel entwickelt, das so genannte *Technopolis*. Dieses Viertel wird durch eine Straßenbahnlinie mit der Innenstadt und dem Hauptbahnhof von Delft verbunden werden. Die Straßenbahnlinie mit der vorläufigen Linienbezeichnung 19 durchquert das Universitätsgelände mit kurzem Abstand zu den Gebäuden. Die Linie wird unter der Verantwortung des *Stadsge-west Haaglanden* (SGH) gebaut.

Die Strecke ist Teil des Netzes der Straßenbahn von Den Haag, *Haagse Tramweg Maatschappij* (HTM), und wird mit der üblichen Energieversorgung mit der Oberleitung als Hin- und den Gleisen als Rückleiter ausgerüstet. Die Kombination aus stromführender Oberleitung und Gleisen bildet einen magnetischen Dipol. In einem Abstand von 50 m von der Strecke erzeugt dieser Dipol bei 500 bis 1000 A Fahrleitungstrom ein Magnetfeld mit einem typischen Wert zwischen 200 und 400 nT. Eine allgemeine Darstellung dieses Phänomens bietet [1]. Für viele wissenschaftliche Instrumente in den Laboren der Universität ist dieser Wert zu hoch. Es handelt sich insbesondere um Elektronenmikroskopen. Das irdische Magnetfeld ist mit 50 μ T zwar höher aber ziemlich konstant und wird in den Instrumenten kompensiert. Das ist bei einem variablen Magnetfeld, das durch den variablen Gleichstrom erzeugt wird, nicht möglich. Die Zahl der Instrumente mit hoher Empfindlichkeit ist so hoch, dass das

Versetzen oder die örtliche Entstörung aller Instrumente zu kostspielig wäre. Daher haben Universität und SGH zusammen Maßnahmen zur Reduktion der magnetischen Emissionen verursacht durch die Straßenbahn beschlossen.

Zweck der Maßnahmen ist das magnetische Feld in 50 m Abstand auf ein Zehntel gegenüber den üblichen Werten zu reduzieren. Ein niedrigerer Wert ist aufgrund des magnetischen Rauschens aus anderen Quellen nicht sinnvoll. Es wurde festgestellt, dass die Strecke auf 2 km Länge angepasst werden muss.

Die Vereinbarung zwischen Universität und der SGH überträgt die Verantwortung für den Entwurf der erforderlichen Anpassungen an die Universität. Die Anpassungen dürfen die Zuverlässigkeit der Bahnenergieversorgung nicht beeinflussen. Die Maßnahmen sollen ausschließlich die Infrastruktur betreffen und nicht das Rollmaterial. Weiterhin soll das angepasste System normalen Sicherheitsanforderungen genügen und so weit wie möglich mit den bestehenden Verfahren und vorhandenen Geräten instandgehalten werden können. Der Bau der Straßenbahnlinie mit der angepassten Energieversorgungsanlage geschieht im Auftrag der SGH.

Die Technische Universität Delft hat *EM Power Systems* beauftragt, eine Reihe möglicher Maßnahmen vorzuschlagen und technisch-wirtschaftlich zu bewerten. Resultat dieses Prozesses ist ein völlig passives Konzept, das die gewünschte Reduktion ergibt und auch die technischen Anforderungen an Machbarkeit, Zuverlässigkeit und Instandhaltung entspricht. Verschiedene Elemente dieses neuen Konzepts wurden patentiert.

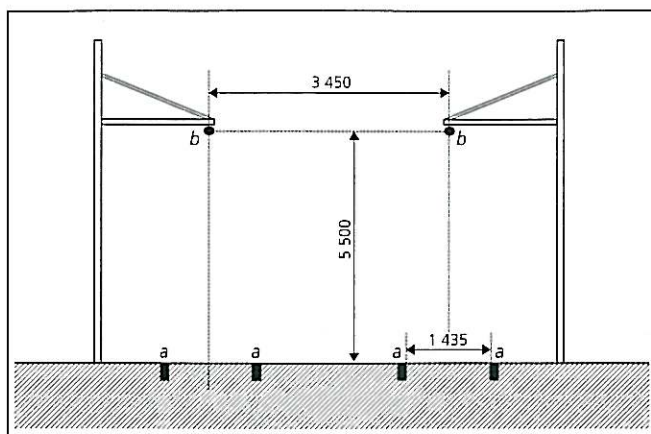


Bild 1: Skizze der Lage von Gleisen a und Fahrdrähten b. Maße in mm.

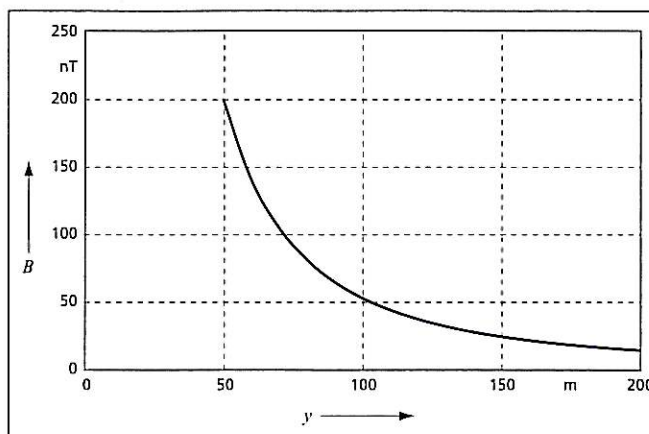


Bild 2: Magnetfeld in Abhängigkeit der Entfernung vom nächsten Gleis ohne Kompensation.

2 Magnetfeld der Bahnstromversorgung

Das grundsätzliche Querprofil einer Straßenbahnstrecke zeigt Bild 1. Die Maße im Bild entsprechen dem größten Teil der Straßenbahnstrecke auf dem Universitätsgelände. Die zwei Fahrdrähte b sind die positiven Leiter und führen zusammen den Strom vom Unterwerk zu den Fahrzeugen. Die vier Schienen a führen zusammen den Rückstrom. Wenn die Gleise zweckmäßig vom Boden isoliert sind, entspricht der Fahrleistungsstrom dem Rückstrom in den Schienen.

Das Magnetfeld kann in einem gewissen Abstand von der Straßenbahnstrecke mit der Formel nach *Biot-Savart* ermittelt werden. Unter der Annahme, dass die Strecke gerade und lang ist im Vergleich zum Messabstand, ist der Beitrag einer einzelnen Leiter auf das Magnetfeld proportional zum jeweiligen Strom und umgekehrt proportional zum Abstand zwischen Leiter und Messanordnung. Das gesamte Magnetfeld wird dann berechnet durch vektorielle Addition.

Bild 2 zeigt das Magnetfeld in 0 m Höhe über Schienenoberkannte (SOK) in Abhängigkeit von Abstand zum äußeren Gleis bei einem Fahrleistungsstrom von 2×250 A. In dieser Berechnung wurde angenommen, dass sich der Strom gleichmäßig in den Fahrdrähten und den Schienen verteilt.

3 Bewertete Maßnahmen

3.1 Oberleitungsloser Betrieb

Die einfachste Möglichkeit, magnetische Felder zu vermeiden, ist auf der Strecke durch den Campus ganz auf eine Energie-

versorgung zu verzichten. Das Fahrzeug muss die Energie in diesem Fall an Bord in einem geeigneten Speichermedium mitführen. Diese Option wurde in diesem Projekt nicht weiter verfolgt, da vorhandene Fahrzeuge auf der neuen Strecke verkehren sollen.

Anzeige

Labor für Korrosionsschutz und Elektrotechnik an der Technischen Akademie Wuppertal e.V.



- Kathodischer Korrosionsschutz
- Streustrom-Korrosionsschutz
- Erdung und Potentialausgleich bei Gleichstrom-Bahnanlagen
- Erdung und Potentialausgleich bei Wechselstrom-Bahnanlagen
- Beeinflussung durch elektromagnetische Felder

Unser Leistungsportfolio umfasst den gesamten Servicebereich. Von der Beratung über Gutachten, Forschung und Personalschulung bis hin zur Erarbeitung von Richtlinien.

Rufen Sie uns an, wir helfen Ihnen gerne:
Dipl.-Ing. Ulrich Bette

0202 / 7495-637 • ulrich.bette@taw.de • www.taw.de

Technische Akademie Wuppertal e.V.
Labor für Korrosionsschutz und Elektrotechnik
Hubertusallee 18 • 42117 Wuppertal • Fax 0202 / 7495-666



3.2 Allgemeiner Grundsatz zu den Reduktionsmaßnahmen

Es ist einfach nachvollziehbar, dass das elektromagnetische DC-Streufeld in über 20m Abstand kleiner wird, wenn man den Abstand zwischen den Hin- und Rückleiter verringert. Zum Beispiel gäbe die Verwendung einer dritten Schiene anstelle der Oberleitung schon eine deutliche Verbesserung. Da die Fahrzeuge über keine entsprechenden Stromabnehmer verfügen und die Errichtung einer dritten Schiene im öffentlichen Verkehrsraum aus Personenschutzgründen nicht möglich ist, scheidet diese Variante aus.

Ein Versorgungssystem mit einer Energiezuführung im Boden wie bei der Straßenbahn in Bordeaux wurde wegen der erwarteten hohen Kosten abgelehnt. Auch sind die vorhandene Fahrzeuge für diese Art der Energieübertragung nicht geeignet.

Es kommt also darauf an, die Speisung über Fahrdrabt und Schienen im Prinzip beizubehalten und die sich gegenseitig kompensierenden Ströme möglichst dicht zueinander zu bringen.

3.3 Aktives System mit Kompensationsleiter

Streufelder können durch Spulen kompensiert werden, wenn deren Leiter nahe am Fahrdrabt und an den Schienen montiert werden. Praktisch hat eine solche Spule eine Länge, die dem Abstand zwischen zwei aufeinander folgenden Oberleitungsmasten gleicht. Der untere Teil befindet sich ungefähr auf SOK und das obere Teil hängt zwischen den Oberleitungsmasten auf Fahrdrabthöhe. Mit einem elektronischen Steuersystem wird in jeder Spule ein Strom in Abhängigkeit vom lokalen Fahrleitungsstrom erzeugt [2].



Bild 3: Luftbild der Teststrecke in Den Haag-Ypenburg. Beschreibung im Text

Durch die zusätzlichen Leiter zwischen den Masten hat ein solches System einen erheblichen visuellen Einfluss auf seine Umgebung, die von der Universität gerade mit ansprechender Architektur neu gestaltet worden ist. Dieses optische Problem kann vermieden werden, wenn man die Oberleitung durch ein koaxiales System ersetzt, wobei der äußere Leiter der eigentliche Fahrdrabt und der innere Leiter Teil der genannten Spule ist. Für den äußeren Leiter wird eine hohle Stromschiene verwendet, unter die der Fahrdrabt geklemmt wird. Derartige Stromschienen werden bereits verwendet. Im Inneren der Stromschiene wird isoliert der Kompensationsleiter geführt. Die Fahr-schienen werden als Leiter auf Bodenebene genutzt. Bei jedem Oberleitungsmast wird eine Verbindung zwischen den Fahr-schienen und dem inneren Kompensationsleiter hergestellt. Das Koaxialsystem ergibt die beste Kompensation von allen ermittelten Varianten und ist patentiert worden [3].

Auch bei dieser Variante sind die Kosten für etwa hundert elektronische Steuersysteme und deren Zuverlässigkeit Gründe, um diese Lösung nicht weiter zu verfolgen.

3.4 Passive Systeme

Passive Systeme haben den Vorteil, dass die Kosten und Zuverlässigkeitsthemen in Zusammenhang mit elektronischen Steuersystemen keine Rolle spielen. In einem passiven System wird entweder der Rückstrom durch einen Leiter geführt, der sich in der Nähe der Fahrleitung befindet, oder wird der Fahrleitungsstrom wird hauptsächlich durch einen Leiter in der Nähe der Schienen geführt.

Im Projekt sind beide Varianten verglichen worden. Eine Ausgestaltung der ersten Variante ist im Jahr 2000 von *Hernando Grande* et al. in einem Patent beschrieben worden [4]. Aus der Kombination von Anforderungen an Sicherheit und Einfachheit zur Fehlersuche hat sich für die Linie 19 die zweite Variante als bevorzugte Option herausgestellt.

4 Einfluss von Streuströmen

4.1 Problembeschreibung

Alle Maßnahmen und Berechnungen basieren auf mit der Annahme, dass der Rückstrom in den Schienen und nicht im Boden fließt. Weil die Linie im Universitätsgelände meistens in der Straße oder als Rasengleis gebaut wird, muss mit Streuströmen gerechnet werden. Im Lastenheft des Projekts wird gefordert, dass die Schienen hochisoliert gegen Erde ausgeführt werden sollen, um die Streuströme möglichst niedrig zu halten.

Es können jedoch auch aus anderen Quellen Gleichströme im Boden fließen, die zur Bildung von Magnetfeldern beitragen. Um solche Effekte beurteilen zu können, sind bei einer anderen Straßenbahnstrecke der HTM Ströme und Magnetfelder gemessen worden.

4.2 Messaufbau

Die Messungen wurden bei einem Streckenteil der HTM-Linie 15 bei Den Haag-Ypenburg ausgeführt. Bild 3 zeigt ein Luftbild dieses Gebietes. Die Straßenbahnlinie ist mit einer gelben Linie markiert. Sie verläuft über 1500 m Länge in einer Gerade von Südwest nach Nordost. Nordwestlich der Linie befindet sich der Wohnviertel Ypenburg. Der Bereich südwestlich der Strecke ist zum Zeitpunkt der Messungen in November 2006 noch unbebaut. Das Bild wurde später gemacht und zeigt die ersten Gebäude südlich der Strecke.

Am nordöstlichen Ende der Gerade biegt die Strecke 90° nach rechts ab. Nach ungefähr 250 m befindet sich das Unterwerk, markiert durch einen roten Kreis, welches die Strecke speist. In der Nähe des südwestlichen Endes befindet sich ein Längskupplungsschalter, der während der Tests geöffnet ist. Die anschließende Strecke wird von einem anderen Unterwerk versorgt.

Gemessen wurden das DC-Magnetfeld in x -, y - und z -Richtung in unterschiedlichen Abständen entlang der blauen Linie. Der Fahrleitungsstrom und die Ströme in den Gleisen wurden im Bereich der weißen Markierung erfasst. Weiterhin wurde das Magnetfeld 200 m nordöstlich des weißen Kreises vor allem während des Stillstands eines Fahrzeugs gemessen, um die Effekte durch die vom Fahrzeug verursachte lokale Verformung des Erdmagnetfeldes sowie durch vom Fahrzeug herrührende Permanentmagnetfelder zu bestimmen. Die Effekte sind zwar sehr klein, waren aber bei den geforderten niedrigen Magnetfeldern möglicherweise nicht vernachlässigbar.

Die Gleise auf der Geraden sind als Rasengleis ausgeführt. Das Wetter war während der Messungen herbstlich mit viel Regen, so dass die Voraussetzungen für Streuströme gegeben waren.

4.3 Messergebnisse

Aus den elektromagnetischen Modellen folgt, dass in Abständen >50 m vom Gleis das Magnetfeld nach Korrektur des Erdmagnetfeldes vor allem eine y -Komponente haben soll. Die y -Richtung ist in horizontaler Ebene quer zur Fahrtrichtung. Dies wird durch die Messungen bestätigt. Außerdem ist die y -Komponente ziemlich genau proportional zum Fahrleitungsstrom.

Bild 4 zeigt beispielsweise die Messergebnisse 50 m südöstlich der Strecke. Bild 5 zeigt den Strom in der Fahrleitung und in den Gleisen. Die Analogie des gemessenen Magnetfeldes und des Stromes in den Gleisen ist bemerkenswert. 45 s nach Beginn passiert ein Fahrzeug aus Richtung des Unterwerks die Messgeräte in den Gleisen. Ab diesem Zeitpunkt sind der Unterwerksstrom in den Gleisstrom und das Magnetfeld quer zum Gleis sichtbar. Das Vorbeifahren eines Fahrzeugs verursacht kurzfristig eine z -Komponente im Magnetfeld. Die x -Komponente ist zum Teil proportional zum Gleisstrom, zum Teil korreliert sie jedoch überhaupt nicht mit dem Strom in den Gleisen.

Die weitere Analyse der Ergebnisse bestätigt den erwarteten Zusammenhang zwischen Gleisstrom und Magnetfeld auch quantitativ in Abhängigkeit der Entfernung von der Strecke. Daraus kann geschlossen werden, dass Streuströme zwar auftreten können, sie aber so klein sind, dass sie für die zu bestimmenden Magnetfelder in den Laboren vernachlässigbar sind.

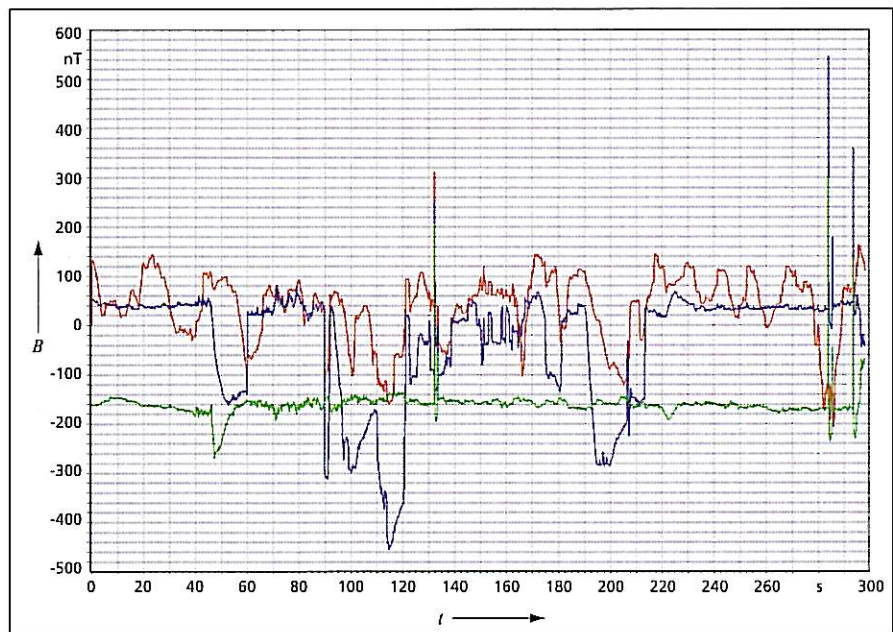


Bild 4: Gemessenes Magnetfeld 50 m von der Straßenbahnstrecke.

Horizontale Achse: 10 s/div, vertikale Achse: 20 nT/div.

rot x -Komponente in Gleisrichtung
blau y -Komponente quer zum Gleis
grün z -Komponente in vertikaler Richtung

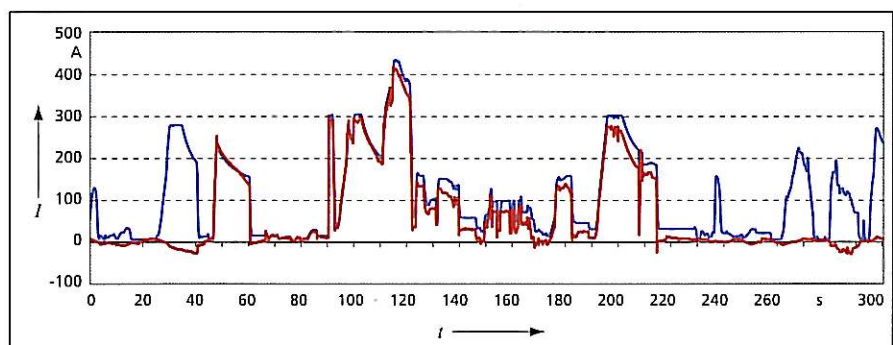


Bild 5: Gemessene Ströme im Unterwerk (blau) und in den Gleisen am Messplatz (rot).

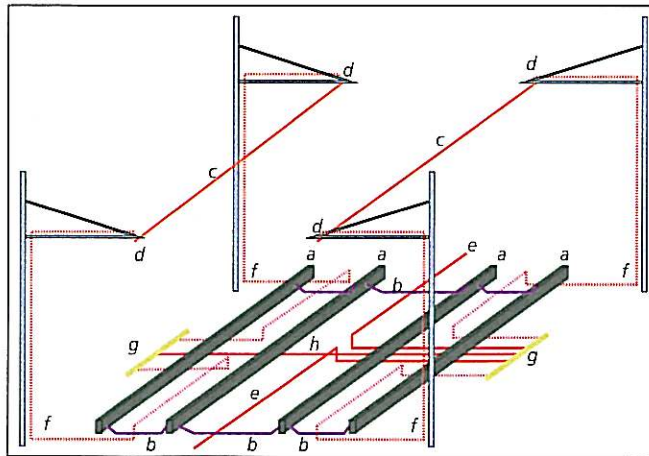


Bild 6: 3D-Skizze der Stromleiter in einem Oberleitungssegment. Erklärung im Text

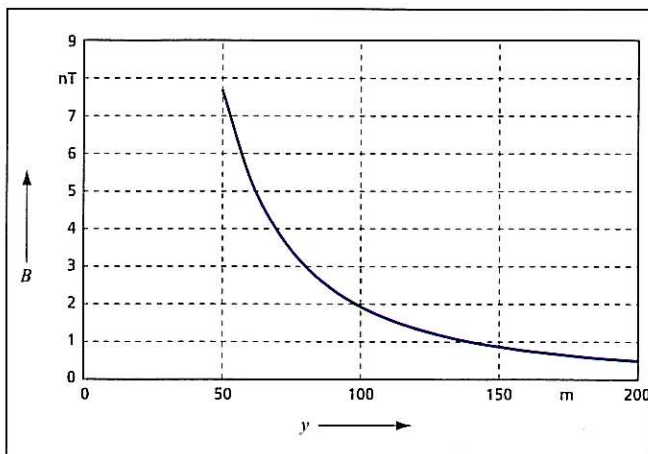


Bild 7: Magnetfeld in Abhängigkeit der Entfernung vom nächsten Gleis mit Kompensation.

5 Vorgeschlagenes Kompensationssystem

5.1 Prinzipielle Auslegung

Im vorgeschlagenen Kompensationssystem wird die Fahrleitungstrom in unmittelbarer Nähe des Fahrzeugs im Fahrdrat aus einem Kabel, das sich im Boden befindet, im geometrischen Schwerpunkt der vier Schienen eingespeist. Dieses Kabel wird *Traktionskabel* genannt. Kabel in jedem Oberleitungsmast, die so genannten *Kompensationskabel*, führen den Strom vom Bodenkabel zur Fahrleitung (Bild 6):

Die Fahrleitung c ist in voneinander isolierte Segmente unterteilt. Die Segmente sind so lang wie der Abstand aufeinanderfolgender Fahrleitungsmaste. Die Fahrleitungstrenner d befinden sich prinzipiell an jedem Mast. An beiden Seiten eines Trenners wird ein Kompensationskabel f angeschlossen. Es existieren somit im Allgemeinen zwei Kompensationskabel pro Fahrleitungsmast. Die Darstellung zeigt, dass die Kompensationskabel nicht direkt zum Traktionskabel e führen, sondern in die Gleismitte geführt und mittig zwischen zwei Fahrleitungsmasten mit dem Traktionskabel über eine Verbindungsschiene g verbunden werden. Verbindungsschiene g ist in einem Hochspannungskasten montiert, der nur für qualifiziertes Personal

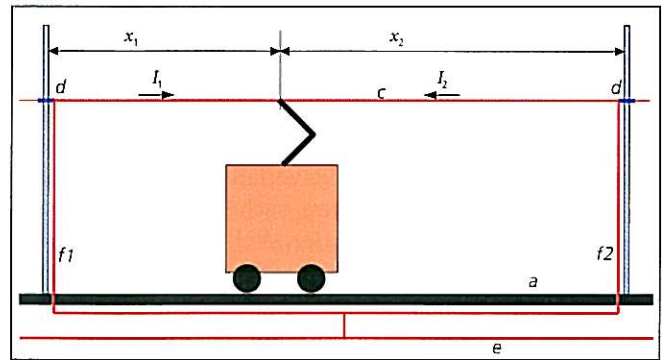


Bild 8: Schematisches Querprofil eines Oberleitungssegmentes mit Stromverteilung in Oberleitung und Kompensationskabeln.

zur Inspektion oder Fehlersuche zugänglich ist. Die Schienen a werden bei jedem Fahrleitungsmast untereinander mit Querkupplungskabeln b verbunden.

Weil die Länge der Kompensationskabel kritisch ist, befinden sich die Verbindungsschienen beidseitig der Strecke. Beide Verbindungsschienen sind mit Querkabeln h verbunden.

5.2 Elektromagnetisches Feld der Kabelanordnung

Wenn im Traktionskabel ein Strom fließt, dann fließt derselbe Strom durch die Schienen zurück. Die vier Schienen sind regelmäßig miteinander verbunden, damit der Rückstrom gleichmäßig auf die vier Schienen aufgeteilt wird. Das Traktionskabel befindet sich im Schwerpunkt der vier Schienen, so dass die Ströme zusammen kein magnetisches Dipolmoment erzeugen. Das magnetische Streufeld fällt dann mit der dritten Potenz der Entfernung von der Strecke statt mit dem Quadrat wie bei einem Dipol. Bild 7 zeigt das Magnetfeld bei dieser Anordnung unter denselben Voraussetzungen wie in Bild 2 für die normale Anordnung. In einem Abstand von 50 m ist das Magnetfeld nur noch 7,7 nT stark.

Die Situation im Segment, in dem sich das Fahrzeug befindet, ist komplizierter. In einem vereinfachten Modell stellt man sich das Fahrzeug sehr kurz im Vergleich zur Länge des Segmentes vor, die 30 bis 40 m beträgt. Wenn ein Fahrzeug Strom aus der Fahrleitung abnimmt, fließt derselbe Strom senkrecht unter dem Fahrzeug als Rückstrom in die Fahrleitungen zurück. Es formen sich jetzt zwei Stromkreise, wie Bild 8 zeigt. Links vom Fahrzeug entsteht ein Strompfad über Kompensationskabel $f1$, Oberleitung c , Stromabnehmer und Fahrzeug zu den Schienen. Das magnetische Moment dieses Stromkreises ist proportional zum Produkt des Stromes I_1 und der Länge x_1 . Rechts vom Fahrzeug befindet sich in Analogie ein Pfad aus Kompensationskabel $f2$, Oberleitung c , Stromabnehmer und Fahrzeug mit einem magnetischen Moment proportional zum Produkt vom I_2 und x_2 . Weil die Stromrichtungen in beiden Kreisen entgegengesetzt sind, kompensieren sich die zwei Momente, wenn gilt $I_1 \times x_1 = I_2 \times x_2$. Ist der Widerstand der Kompensationskabel viel kleiner als der Fahrleitungswiderstand, dann ist diese

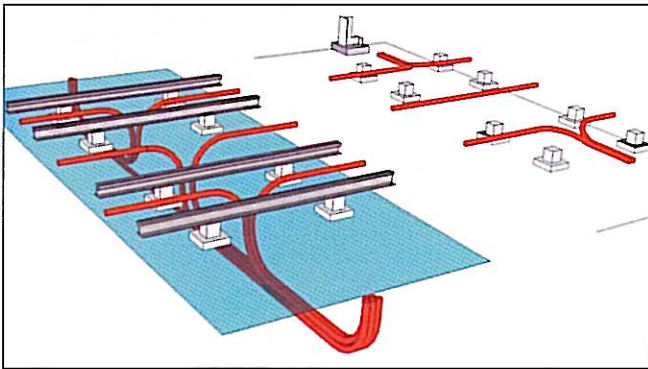


Bild 9: 3D-Detail der Kabelkanäle unter den Schienen.



Bild 10: Test von Kabelverlegung im eingegossenen Kabelkanal.

Voraussetzung erfüllt und es gilt auch in diesem Segment, dass das magnetische Streufeld mit der dritten Potenz der Entfernung zur Strecke sinkt.

Diese Auslegung ist von den Erfindern patentiert worden [5].

In der Praxis kann ein Fahrzeug eine Länge bis 40 m haben und ist der Stromweg im Fahrzeug nicht genau bekannt. Die Asymmetrie die daraus resultiert verursacht wahrscheinlich die größte Restkomponente des Magnetfeldes. Sobald das System tatsächlich gebaut worden ist, werden Messungen gemacht um dieses Resteffekt zu ermitteln.

5.3 Praktische Aspekte

5.3.1 Fahrleitungstrenner

An jedem Fahrleitungsmast muss ein Isolator (Trenner) in der Fahrleitung montiert werden. Um den Betrieb nicht zu behindern, muss ein Fahrzeug mit normaler Fahrgeschwindigkeit und vollem Traktionsstrom den Trenner befahren können. Dazu muss der Trenner so ausgeführt sein, dass beim Befahren beide Seiten über die Stromabnehmerpalette kurzgeschlossen werden. Des Weiteren muss er so beschaffen sein, dass er nur minimale mechani-

sche Stoßbelastungen für den Stromabnehmer erzeugt. Er dient nicht der Trennung von Speiseabschnitten. Es wird zurzeit geprüft, ob auf dem Markt verfügbare Bauteile diese Bedingungen erfüllen oder ob eine Neuentwicklung erforderlich ist. Mit einer Eigenentwicklung wurden bereits Tests durchgeführt.

5.3.2 Kabel

Zum größten Teil werden die Straßenbahngleise in geschlossenem Oberbau verlegt. Das Traktionskabel und das Kompensationskabel werden 10 bis 20 cm unter Straßenoberkante in Kabelkanälen verlegt. Die Kabelkanäle müssen während des Baus im Beton verlegt werden. Die Kabel selbst werden nach Abschluss von Straßen- und Gleisbau in die Kanäle eingezogen. Die Kanäle haben mindestens sechs 90°-Bögen (Bild 9).

Das Traktionskabel hat 500 mm² Querschnitt und einen flexiblen Kern. Es muss gewährleistet werden, dass das Kabel ohne Beschädigungen in einem Kanal gezogen werden kann. Hierfür wurde ein Test durchgeführt, wobei die Zugspannung während des Zugprozesses festgelegt wurde. Bei diesem Test wurde ein komplettes Segment mit 40 m Länge gebaut. Bild 10 zeigt bei einem der Tests den Moment, an dem das Kabelende aus dem Kanal kommt. Es wurde festgestellt, dass die Zugspannung unter allen Umständen unter dem für das Kabel zugelassenen Wert bleibt.

5.3.3 Verbindungsschienen

Die Verbindungsschienen dienen nicht nur der Verbindung der unterschiedlichen Kabel. Es soll auch möglich sein, ein defektes Kabel schnell vom System zu trennen. Sie werden darum in dazu geeigneten Kästen montiert. Die Positionsgenauigkeit der Kästen ist maßgebend für die Qualität der Kompensation. Manchmal kann die geforderte Position für Fußgänger eine Gefahr darstellen, insbesondere an Haltestellen. In diesen Fällen werden die Kästen unterirdisch untergebracht.

5.3.4 Querschnitt der Kompensationskabel

Die maximale Länge eines Oberleitungssegmentes ist 40 m. Ein Fahrzeug verbleibt also im Allgemeinen nur kurz in einem Segment, so dass die Kompensationskabel thermisch nicht sehr hoch belastet werden. Wie oben genannt, ist es aber für die Wirksamkeit der Kompensation erforderlich, dass der Widerstand der Kompensationskabel viel kleiner ist als der Widerstand der Fahrleitung. Darum wird für die Kompensationskabel derselbe Kabeltyp verwendet wie für das Traktionskabel, 500 mm² Cu. Auch wird die Oberleitung so aufgebaut, dass das Tragseil nicht stromführend ist.

6 Ausblick

Zurzeit wird das Lastenheft für den Straßen- und Straßenbahnbau zusammengestellt. Der Bau der Energieversorgung einschließlich Kabelverlegung soll zur selben Zeit wie der Bau eines anschließenden Teiles von Linie 19 erfolgen, der aus anderen Gründen verspätet ist. Die Betriebsaufnahme wird für 2012/2013 erwartet.

Die Autoren danken ihren Kollegen Jacques Nonhebel, Dick van Bekkum, Evert-Jan Bouvy und Mark van Bekkum für ihre Mitarbeit an den Messungen.

Literatur

- [1] Hadrian, W.: Die magnetischen Störfelder des elektrischen Bahnbetriebes. In: Elektrotechnik & Informationstechnik 123 (2006), H. 1/2, S. 46–49.
- [2] Kruit, P.; Ferreira, J.A.: Kompensationsgerät für ein Magnetfeld. Europäische Patentanfrage Nr. 1684848, eingereicht 08.06.2007.
- [3] Gravendeel, B.; van Overbeeke, F.: Bau-Element für elektrische Stromversorgung von einem Schienenfahrzeug und elektrisches Stromversorgungssystem mit einem solchen Bauelement. Holländisches Patent Nr. 1034189, eingereicht 25.07.2007, genehmigt 27.01.2009.
- [4] Hernando Grande, A.; Rivero Rodriguez, G.; Briones Fernandes Pola, F.; Marin Palacios, P.: Stromsystem zur Kompensation des Magnetfeldes erzeugt von Elektrischen Bahnen. Europäischer Patentanfrage Nr. 1072463, eingereicht 03.02.2000. US-Patentanfrage 6,492,746, B1, genehmigt 10.12.2002.
- [5] Kruit, P.; van Overbeeke, F.; Gravendeel, B.: Eisenbahninfrastruktur. Holländische Patentanfrage Nr. 2000756, eingereicht 17.07.2007; Europäischer Patentanfrage 2017118, eingereicht 30.06.2008.



Dr. ir. Frank van Overbeeke (50), Studium Elektrotechnik an der Technischen Universität Delft, Abschluss 1982; bis 1986 Doktorat an der Universität Twente 1986; ab Entwicklungs- und Verkaufingenieur für Traktionsantriebe; ab 1997 R&D-Manager bei Energieunternehmen; seit 2003 Partner bei EM Power Systems, unabhängiger Berater für Elektrische Energieanlagen.

Adresse: EM Power Systems BV, Postfach 50, 3830 AB Leusden, Niederlande;
Fon +31 64 4488256, Fax: +31 84 7289151;
E-Mail: fvo@empowersystems.nl;
Internet: www.empowersystems.nl



Dr. ir. Bas Gravendeel (54), Studium Elektrotechnik an der Technischen Universität Delft, Abschluss 1982; bis 1987 Doktorat an der Technischen Universität Eindhoven; ab 1988 Entwicklungsleiter Leistungselektronik; ab 1999 Leiter Bahnsysteme Betuweroute; seit 2005 Partner bei EM Power Systems, unabhängiger Berater für Elektrische Energieanlagen.

Adresse: siehe oben;
Fon +31 64 3005786;
E-Mail: bg@empowersystems.nl



Dr. ir. Pieter Kruit (56), Studium Technische Physik an der Technischen Universität Delft, Abschluss 1978; bis 1982 Doktorat für Atomphysik an der Universität Amsterdam, jetzt Professor im Gebiet Elektronen- und Ionenoptik an der Technischen Universität Delft.

Adresse: TU Delft, Postfach 5046, 2600 GA Delft, Niederlande;
Fon +31 15 2785197;
E-Mail: p.kruit@tudelft.nl;
Internet: www.ist.tudelft.nl



Ir. Lou van der Sluis (59), Studium Elektrotechnik an der Technischen Universität Delft, Abschluss 1974; ab 1977 Hochleistungslabor KEMA Arnhem; seit 1992 Professor Energiesystemen und Hochspannungsanlagen an der Technischen Universität Delft.

Adresse: TU Delft, Postfach 5031, 2600 GA Delft, Niederlande;
Fon +31 15 2785782;
E-Mail: l.vandersluis@tudelft.nl;
Internet: www.ewi.tudelft.nl/eps