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: 87 (1996)

Heft: 21

Artikel: Gezielte Rückstromführung in Bahnstromanlagen : Erdungsverhältnisse und Magnetfelder bei einphasigen Bahnanlagen : ein stets aktuelles Bahnstromthema

Autor: Lörtscher, Manfred

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-902378

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: 12.12.2025

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

Steigende Traktionsleistungen führen zu höheren Anforderungen an eine gezielte Bahnstromrückführung bei einphasigen Bahnanlagen. Mit den örtlich getrennt verlaufenden Hin- und Rückströmen stellen sich zahlreiche Beeinflussungsfragen, welche neuerdings auch in Euro-Normen einheitlich behandelt werden sollen. Neue Simulations- und Rechenmethoden sowie Ergebnisse von umfangreichen Betriebsmessungen erlauben jetzt eine eindeutige Beurteilung der verschiedenen Rückstrom- und Magnetfeldverhältnisse in bahnnahen, oft dichtüberbauten Gebieten und damit angepasste Massnahmen.

Gezielte Rückstromführung in Bahnstromanlagen

Erdungsverhältnisse und Magnetfelder bei einphasigen Bahnanlagen – ein stets aktuelles Bahnstromthema

■ Manfred Lörtscher

Seit den ersten Betriebsaufnahmen sowohl mit Gleichspannung wie auch mit hoch gespannter Wechselspannung – bei den SBB mit 15 kV und 16,7 Hz – war die Rückstromführung bei der einphasigen Bahnstromversorgung stets ein besonderes Thema (Bild 1). Zu Beginn waren es vor allem die Telefonleitungen und Fernmeldekabel längs der Bahntrassen (gemäss [1], Art. 9, bestand schon 1902 ein gewisser «free access» für Telegrafen- und Telefonlinien längs den Bahntrassen!), welche direkt leitend oder strahlend beeinflusst wurden. Bei der frühen (1920–1930) weiträumigen Elektrifizierung des SBB-Netzes wurden für die damaligen Beeinflussungsverhältnisse technisch geeignete Streckenkabel verlegt. Diese konnten jedoch den Anforderungen der stark ansteigenden Bahnströme in den sechziger Jahren nicht mehr genügen. Zusätzliche Überlegungen und umfangreiche Messungen an den bestehenden alten und neuen Kabeltypen wurden damals zudem im Hinblick auf die Einführung der Thyristortraktion durchgeführt. Dabei wurde auch die Wirkungsweise von Erdseilen zur Reduktion von Beeinflussungen untersucht. Seit Anfang der achtziger Jahre werden alte Fernsteuerkabel laufend durch neue Typen ersetzt. Gleichzeitig wird ein SBB-internes, flächendeckendes digitales Telefonnetz (Difonet) unter Verwendung von Lichtwellenleitern aufgebaut. Alle diese Massnahmen haben die Beeinflussungsprobleme durch die Traktionsrückströme im direkten Bahnbetriebsbereich drastisch vermindert.

Dennoch steht auch heute eine ganze Reihe von Beeinflussungsfragen zur Diskussion, welche in diesem Artikel erläutert werden. Insbesondere auf Stationsgebiet und in dichtüberbautem Gebiet sind mannigfaltige Probleme zwischen den Betreibern von elektrischen Bahnanlagen und -einrichtungen, den energieliefernden Werken und allenfalls betroffenen Dritten zu entschärfen. In jüngster Zeit versuchen die SBB, diese noch gezielter einer der betreffenden Situation angepassten Lösung zuzuführen, indem sie für diese Anlagen rechtzeitig ein übergeordnetes Erdungskonzept entwerfen. Diese für viele

Adresse des Autors
Manfred Lörtscher, Dipl. El.-Ing. ETHZ, Schweizerische Bundesbahnen, Bauabteilung Kreis III Elektrische Anlagen, Postfach, 8021 Zürich

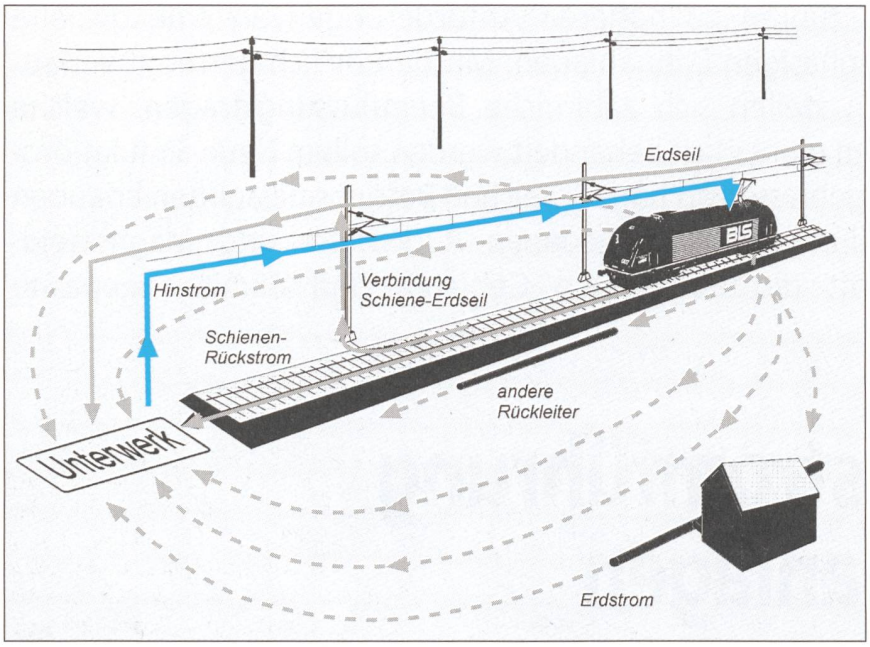


Bild 1 Bahnstromrückführung
Während die Hinströme auf wohl definierten Leitungen fliessen, verteilen sich die Rückströme weiträumig auf ganz verschiedenen Wegen.

am Projekt Beteiligte wichtige Projektierungsgrundlage wird entsprechend der Projektphase (Studie, Vorprojekt, Bauprojekt, Ausführung) angepasst und vertieft. Schliesslich dienen diese Unterlagen zur späteren gezielten Überprüfung der Erdungsmassnahmen durch die Installationskontrolle gemäss der Verordnung über elektrische Anlagen von Bahnen (VEAB, [2]) und der Verordnung über elektrische Niederspannungsinstallationen (NIV, [3]).

Anforderungen an eine sichere Bahnstromrückführung

Die Anforderungen an eine sichere und optimale Bahnstromrückführung sind in den letzten Jahren stark angestiegen. Die Hauptgründe sind:

- die höheren installierten und ausgenützten Triebfahrzeugleistungen,
- oft Einsatz der Triebfahrzeuge in Mehrfachtraktion (S-Bahn-Betrieb, Huckepackzüge),
- entsprechend erhöhte Kurzschlussleistungen durch zusätzliche Unterwerke und konsequente Vermaschung des Fahrleitungsnetzes (z. B. in grossen Bereichen des Zürcher S-Bahn-Netzes 25 bis 30 kA),
- oft viele Kunstbauten (Tunnels, Brükken) und neue Oberbauformen (Massnahmen gegen Lärm und Erschütterungen) mit reduzierter Erdfühligkeit,
- die allgemeine Problematik der elektromagnetischen Verträglichkeit,
- bestehende und auszubauende Bahntrassen im nah- und dichtbebauten Umfeld.

Neben der Grundsatzfrage der Trennung oder des Zusammenschlusses der Erdungssysteme von Bahn und öffentlicher Stromversorgung tauchen im Zusammenhang mit dem Schutz gegen Streustromkorrosion von Gleichstrombahnen oft weitere Fragen auf, die das Erdungskonzept beeinflussen [4]. Insbesondere treten heute im Bahnbereich vermehrt Bildschirmbeeinflussungen auf, da bei gleichbleibender Bildschirmtechnik grössere und besser auflösende Bildschirme verwendet werden. Zu diesem Themenkreis wurde bereits in [5] der damalige Stand wiedergegeben. Neben diesem seit längerer Zeit bekannten Thema geht es zusätzlich darum, im Rahmen der laufenden Diskussionen und Normenarbeiten die Möglichkeiten und Grenzen im Bereich der niederfrequenten elektrischen und magnetischen Felder von 15-kV-Bahnanlagen besser kennenzulernen. Durch die örtlich weit getrennt verlaufenden Hin- und Rückströme sind verschiedenste Konfigurationen anzutreffen. Dies erschwert auch allgemeingültige Aussagen. Das vielschichtige Thema kann heute einerseits durch verbesserte, rechnerunterstützte Messungen und andererseits durch neue Simulationsmethoden (Berechnungen des Bahnstrombedarfs, der Stromverteilung auf die Hin- und Rückleiter und der Feldverteilung) mit vertretbarem Aufwand vertieft angegangen werden.

Schweizerische Verordnungen und Euro-Normen

Besondere Verhältnisse entstehen, wenn das Erdungssystem einer einphasig betriebenen elektrischen Bahn mit einem Erdungssystem der öffentlichen Stromversorgung zusammentrifft. In der am 5. Dezember 1994 in Kraft getretenen Verordnung über elektrische Anlagen von Bahnen (VEAB, [2]) sind im Artikel 39 die Grundsätze der Erdungsvorschriften bei Bahnen und im Artikel 40 das Verhalten beim Zusammentreffen von Erdungssystemen festgehalten. Artikel 40 verlangt einzig und allein, dafür zu sorgen, dass keine unzulässigen Berührungs- oder Schrittspannungen auftreten. Ob die Erdungssysteme zu trennen oder zusammenzuschliessen sind – diese beiden technischen Möglichkeiten werden explizit erwähnt –, wird den Betriebsinhabern überlassen. Sogar der Gesetzgeber erkennt hierin die Problematik dieses Fachgebietes und lässt die beiden gegensätzlichen Lösungen zu.

Die SBB bevorzugen nach durchwegs positiven Erfahrungen den Zusammenschluss der Erdungssysteme der beiden Netze, da jeweils sowohl der örtliche Teil des Bahnnetzes wie auch der örtliche Teil des Fremdnetzes ausgedehnte Netze darstellen. Im Nahbereich von Bahnstrom-Unterwerken müssen die örtlichen Verhältnisse genau bekannt sein: In der Regel können auch hier die Erdungssysteme verbunden werden. In jedem Fall sind aus einem Fremdnetz gespeiste Anlagen im Bahnspannungsbereich mit getrennten Neutral- und Schutzleitern auszurüsten. Zusätzlich sind alle bahnfremden Anlagen, die mit der Bahnerde zusammengeschlossen sind, in der gleichen Schutzart auszuführen.

Die europäischen Bahnen – wobei hier noch die verschiedenen Bahnstromsysteme (1,5 kV und 3 kV Gleichspannung sowie Wechselspannung 25 kV, 50 Hz aus dem Landesnetz) zu beachten sind – kennen keine anderen oder weitergehenden Vorschriften im Erdungsbereich. Die Massnahmen sind neuerdings in der prEN 50122-1 [6] zusammengefasst. Sie können auch innerhalb der SBB ohne Anpassung der bereits bestehenden Erdungsvorschriften einheitlich angewandt werden. Zurzeit beruhen die Lösungen grundsätzlich auf den vorher erwähnten Artikeln der VEAB. Für die maximal zulässigen Berührungsspannungen gelten auch für die Bahnen die Werte im Anhang 4 der Starkstromverordnung [7]. Im Kurzschlussfall wird dabei mit einer gesicherten Abschaltzeit von längstens 120 ms gerechnet.

Im Bereich der elektromagnetischen Verträglichkeit müssen – der gestiegenen Bedeutung dieses Themas entsprechend – auch im Bahnbereich in einem sehr breiten Gebiet verlässliche Aussagen gemacht und entsprechende Messungen durchgeführt werden. Einerseits bestehen Berichte aus der Schriftenreihe des Buwal [8, 9] und die neuen ENV 50166 [10, 11] über die biologischen Wirkungen der magnetischen Felder sowie andererseits die ENV 50121 [12–17] über die eigentliche elektromagnetische Kompatibilität bei Bahnanwendungen. Bereits die grosse Anzahl der aufgeführten Europäischen Normen (EN) über die EMV (im Vergleich zur Anzahl EN im Erdungsbereich) unterstreicht die heutige Bedeutung dieses Themas. In nächster Zeit soll in der Schweiz eine auf dem Umweltgesetz basierende Verordnung über die Wirkung nichtionisierender Strahlung mit Grenzwerten in Vernehmlassung gehen.

Elemente der Bahnerdung zur gezielten Bahnstromrückführung

Neubaustrecke S-Bahn Zürich als Beispiel für neue Bahnanlagen

Am Beispiel der Neubaustrecke der S-Bahn Zürich (Bild 2) werden nachfolgend Probleme und Lösungen gezeigt, welche den heutigen Stand der Technik wiedergeben. Dabei werden die Erfahrungen aus Planung und Betrieb sowie die Ergebnisse der umfangreichen Simulationen und Messungen dargestellt. Messmethode und Simulationsmodell wurden zusätzlich als Vergleich an einer einfachen, einspurigen Tunnelstrecke (Landikoner Tunnel) auf der Strecke Zürich-Altstetten – Affoltern am Albis – Zug in wenig überbautem Gebiet überprüft. Sämtliche Erkenntnisse können bei allen neuen Projekten ähnlicher Art erfolgreich umgesetzt werden.

Die 12 km lange S-Bahn-Neubaustrecke besteht grösstenteils aus Kunstbauten. Davon verlaufen 8,5 km im Hirschengraben- und im Zürichbergtunnel und 1,5 km auf den Neugutviadukten. Bei den Tunnels werden bestehende Gebäude teilweise nur knapp unterfahren, was zu Fragen der elektrischen und mechanischen Beeinflussung führte. Umfangreiche 15-kV-Mittelspannungskabelanlagen in den Tunnels, Massnahmen gegen Lärm und Erschütterungen, Streuströme der Strassenbahn sowie der Schutz der Bauwerke gegen Korrosion stellen besondere Anforderungen an die Bahnerdung und Bahnstromrückführung. Dies führte zu einem stark vermaschten Bahnerdesystem. Die Erdungssysteme der Bahn und der öffentlichen Stromversorgung (EWZ) sind zusammengeschlossen. Um die Zusammenhänge und Begriffe zu verstehen, werden in den nächsten Abschnitten die Elemente der Bahnerdung kurz gestreift.

Rückstromführung über die Gleise als Grundsatz

Im Bereich der Neubaustrecke wurden die Gleisstromkreise als Frequenz-Ton-Gleisstromkreise (FTGS) ohne Isolierstösse ausgeführt. Somit stehen für die Rückstromführung jeweils beide Schienen pro Gleis zur Rückstromführung zur Verfügung. Über die FTGS-Schienenverbinder fliessen Traktionsausgleichsströme zwischen der isolierten und der geerdeten Schiene. Die Weichenanlagen im Bahnhof Museumstrasse sowie die Gleise und teilweise die Weichen im Bahnhof Stadelhofen wurden mit UIC-54-Schienen auf Holzschwellen in ein Schotterbett gelegt. Im Hirschengraben- und im Zürichbergtunnel kam für Gleise und Weichen der schotterlose Oberbau mit UIC-54-Schienen zur Anwendung. Von Stettbach bis Dietlikon und Dübendorf wurde der Oberbau mit Schienen UIC-60 (bei den Weichen auf Holz-, bei den Gleisen auf Betonschwellen) in einem konventionellen Schotterbett ausgeführt. Damit resultieren für die verschieden ausgeführten Abschnitte auch unterschiedliche Ableitwiderstände gegen Erde.

Auf dem übrigen Netz der SBB – insbesondere auf hochbelasteten Strecken – kommen vielfach auch Gleisstromkreise mit Achszählern zum Einsatz. Damit stehen auch dort beide Schienen eines Gleises zur Rückstromführung zur Verfügung.

Erdseile und Verbindungen der Tragwerkerde mit dem Gleis als wichtige Ergänzungen

Alle Stützpunkte der R-Fahrleitung (Tragseil mit 92 mm² Sta-Cu nachgespannt und Fahrdraht 107 mm² Cu nachgespannt) werden einheitlich pro Streckengleis mit einem Erdseil aus 95 mm² Kupfer verbunden. Die Stützpunkte werden auf der freien Strecke alle 250 m und in Tunnels mit Ringleitungen aus Kupfer alle 100 m mit der geerdeten Schiene des Gleises verbunden. Bei Doppelspurstrekken werden zusätzlich die beiden geerdeten Schienen miteinander verbunden.

Einbezug der Bauwerkerde und Streustromdrainagen

Besondere Erdungsmassnahmen wurden dort erforderlich, wo starke Gefährdungen der tragenden Strukturen von Bauwerken durch Gleichstrom-Streu-

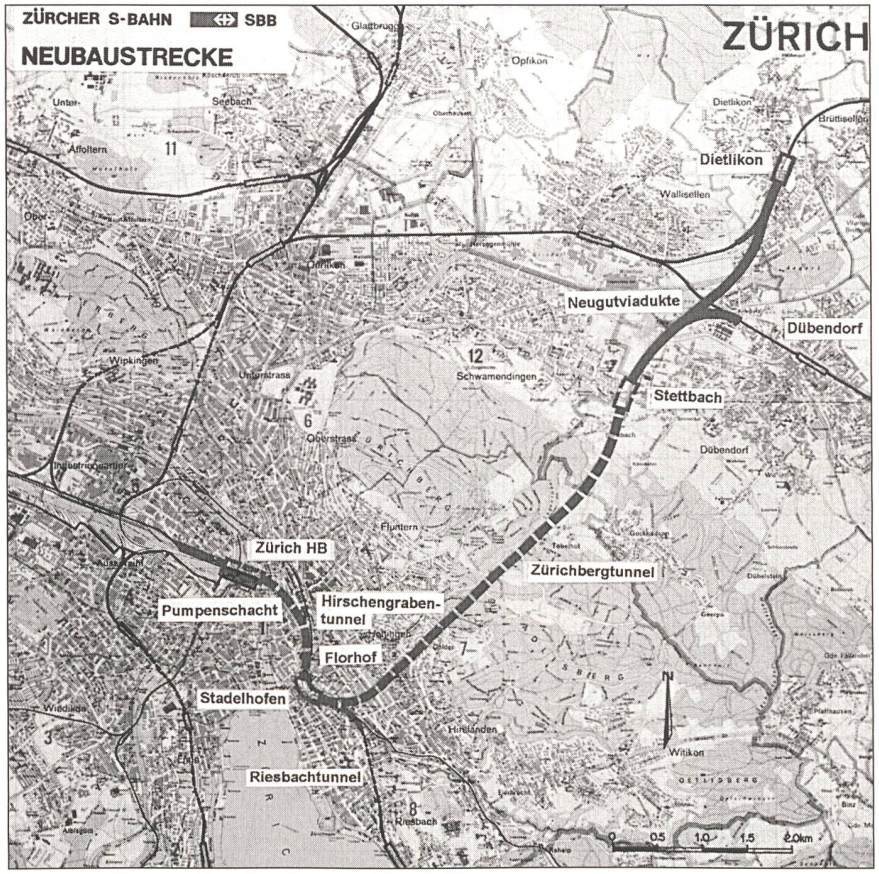


Bild 2 Neubaustrecke S-Bahn Zürich

Die 1990 in Betrieb genommene Strecke besteht grösstenteils aus Kunstbauten und unterquert ein dicht überbautes Stadtgebiet.

ströme zu erwarten sind. Durch die Lage des Strassenbahnnetzes (VBZ) und der zugehörigen Gleichrichterstationen mit einer Gleichspannung von 600 V liegen die Kunstbauten der Bahnhöfe Zürich-Museumstrasse und -Stadelhofen sowie der dazwischenliegende Hirschengrabentunnel im ungünstigen Bereich der austretenden Streuströme. Je nach Ausführungsart der Aussen- und Innenschale in den einzelnen Bauwerksabschnitten wurden ausgewählte Armierungseisen in Längs- und Querrichtung gezielt verschraubt oder verschweisst und durch den Einbau von Erdungsbrücken an die Oberfläche geführt. Von dort werden sie mit den vorher erwähnten Ringleitungen der Bahnerde verbunden. Durch diese Massnahmen entstand eine starke Vermaschung der Bahn- und Bauwerkserde. Um die Streuströme gezielt aus dem vermaschten Erdungssystem herauszuführen, wurden an fünf Orten Verbindungen von der kombinierten Bahn/Bauwerks-Erde an die Gleise der Strassenbahn (VBZ) hergestellt [4].

Massnahmen gegen Lärm und Erschütterungen beeinflussen die Rückstromführung

An verschiedenen Stellen wurden besondere Massnahmen zur Dämpfung von Lärm und Erschütterungen [18] getroffen. Das Material der Unterschottermatten (USM) und die Federelemente der Masse-Feder-Systeme (MFS) sind elektrisch nicht leitend. Insbesondere wurden die Elemente der MFS mit besonderen Erdverbindungen untereinander und mit der Bahnerde verbunden.

Erdung der 15-kV-Mittelspannungskabel zur sicheren Einspeisung in die Fahrleitung

Die Speisung der Neubaustrecke und der angrenzenden Strecken erfolgt auf der Seite Zürich mit zwei getrennten Leitungen ab je einem Speisepunkt des Unterwerks Zürich. Zusammen mit den Umgehungsleitungen der Stationen Museumstrasse und Stadelhofen wurden total 25 km 30/18-kV-Mittelspannungskabel verlegt. Mehrheitlich wurden Kabel mit einem Leiterquerschnitt von 630 mm² und einem Schirm von 70 mm² verlegt. Die Schirme der Kabel werden aus Gründen des Personenschutzes und der Spannungsbeanspruchung an beiden Enden geerdet. Der längste Kabelabschnitt ist 2310 m lang. Zur Entlastung der Schirme wurden zusätzliche Kabel zur Stromrückleitung in unmittelbarer Nähe neben den Hinleitern verlegt: Dafür wurden T-Seile mit einem Querschnitt von 240 mm² eingesetzt.

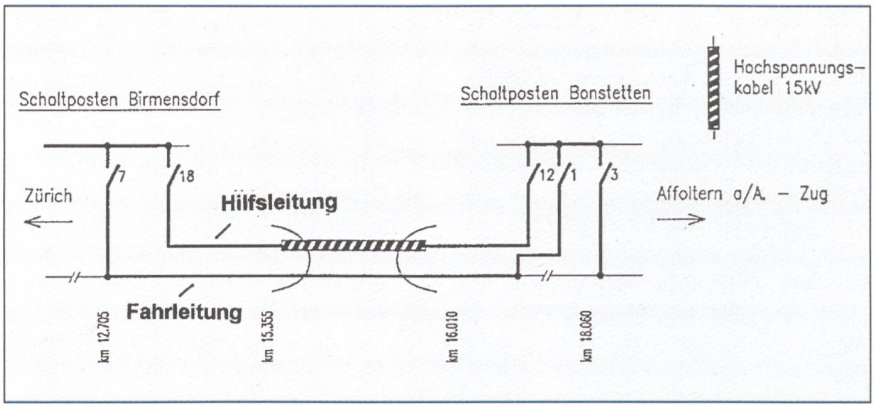


Bild 3 Schema der Bahnstromversorgung im Landikoner Tunnel (Normalschaltung)

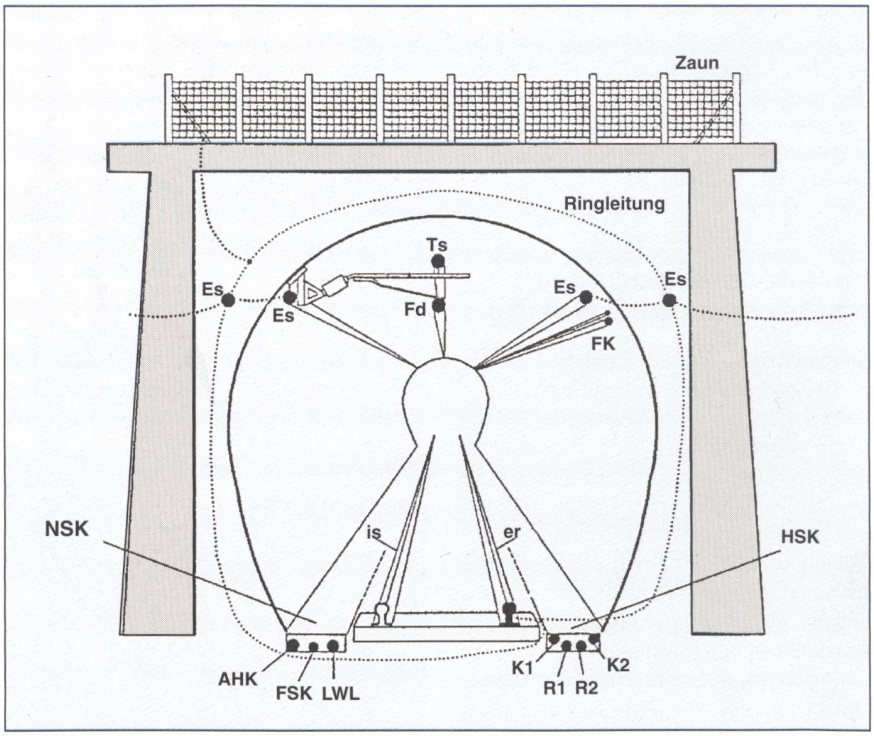


Bild 4 Querschnitt Landikoner Tunnel

AHK	altes Hauptkabel	*FSK*	Fernsteuerkabel	*NSK*	Niederspannungskabel
er	geerdete Schiene	*HSK*	Hochspannungskabel 15 kV	*R1, R2*	Rückleiter *1* und *2*
Es	Erdseil	*is*	isolierte Schiene	*Ts*	Tragseil
Fd	Fahrdraht	*K1, K2*	Kabel *1* und *2*		
FK	Funkkabel mit Tragseil	*LWL*	Lichtwellenleiter		

Versuche und Messungen

Ein weitläufiges Labor erforderlich

Zur Überprüfung der Kabeldimensionierung und der Rückstromverhältnisse wurden während nächtlichen Betriebspausen auf der Strecke Museumstrasse – Stadelhofen einerseits wie auch im Landikoner Tunnel andererseits umfangreiche Messungen an den verschiedenen Hin- und Rückleitern durchgeführt. Um die wesentlichsten Einflüsse auf die Rückstromverteilung zu ermitteln, wurden vorerst Messungen und Simulationen an einer Einspurstrecke mit Hilfsleitung durchgeführt. Die Fahrleitung ist dort – wie auf der Neubaustrecke – ebenfalls mit dem Typ R-Fl ausgerüstet. Im 483 m langen Landikoner Tunnel wird die Hilfsleitung als Kabelstrecke mit 2×400 mm² Mittelspannungskabel und je einem Rückleiter von 150 mm² geführt (Bilder 3 und 4).

Der «Triebfahrzeugort» wurde dabei gut reproduzierbar mit Erdungsstangen an genau definierten Stellen im Netz nachgebildet. Über eine aufwendige Versuchsschaltung (Übertragungsleitungen, Unterwerkstrafos) wurden ab einem

Frequenzumformer im Unterwerk Seebach konstante Ströme von 400 A dauernd zur Verfügung gestellt. Bei solchen Versuchen wird ein «Labor» von 6×30 km Fläche betrieben, wenn die Rückstromverhältnisse nah und fern dem eigentlichen Messobjekt genügend genau erfasst werden sollen. Entsprechend aufwendig sind die betrieblichen Sperren, der Messaufbau, der Betrieb und die Synchronisation von dezentralen Messplätzen und schliesslich die Auswertung der Ergebnisse.

Rückstromverteilung im Tunnel Landikon

Die festgestellten Rückstromverhältnisse können wie folgt charakterisiert werden:

- Etwas mehr als die Hälfte des Stromes wird durch die vorhandenen Rückleiter (Schiene, Erdseile, Kabelmäntel, Parallelrückleiter) zurückgeführt. Der restliche Rückstrom konnte nicht gemessen werden (Erdreich).
- Der Rückstrom in den Kabelschirmen und den Parallelrückleitern beträgt gesamthaft 60–80 % des in den beiden Kabeln fliessenden Hinstromes; in den Schirmen allein fliessen 17–21 %.
- Die geerdete Schiene führt rund 15 % des Laststromes als Rückstrom.
- Die zwei Erdseile im Tunnel führen maximal je 15 % des in der Fahrleitung fliessenden Stromes, im Minimum etwa je 5 % des gesamten speisenden Stromes.

Die verschiedenen Rückstromanteile der gleichen Leiter entsprechen Messungen mit verschiedenen «Triebfahrzeugorten» (direkt am Tunnelausgang sowie 2 oder 12 km vom Tunnel entfernt).

Rückstromverteilung im Hirschengrabentunnel

Die Rückstromverteilung ist im Hirschengrabentunnel im Vergleich zum Tunnel in Landikon viel komplexer. Die Hinströme, die hier stark von der Schaltung abhängig sind, bilden den wesentlichsten Einfluss auf die Rückstromverteilung. Die Bilder 5 *a1* und 5 *a2* zeigen die Verteilung der Ströme an den beiden Messstellen

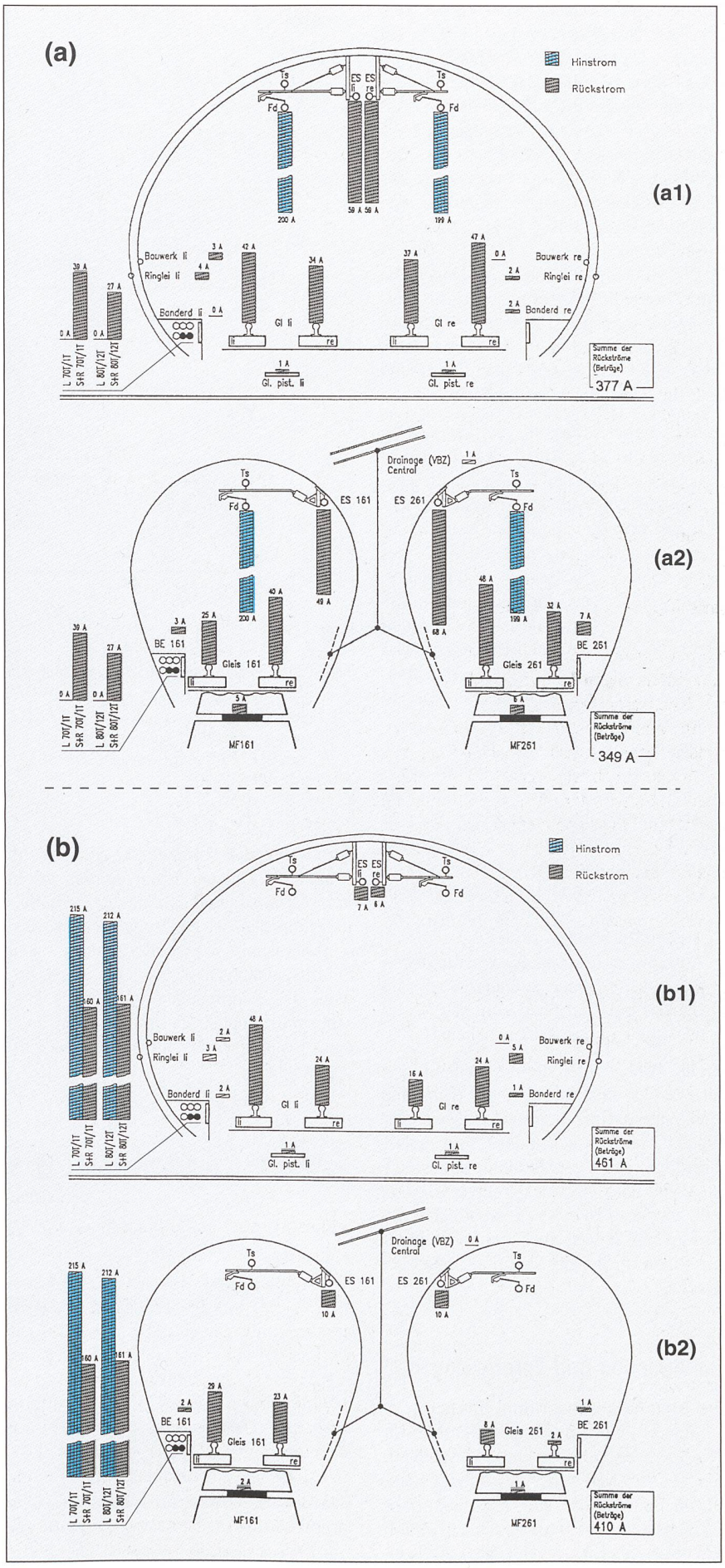


Bild 5 Gemessene Stromverteilung im Hirschengrabentunnel ▶

a Mittelspannungskabel ausgeschaltet, Speisung über die Fahrleitung mit 400 A
b Mittelspannungskabel eingeschaltet, Speisung mit 400 A
a1, b1 Stromverteilungen bei Messstelle «Florhof»
a2, b2 Stromverteilungen bei Messstelle «Pumpenschacht»

Florhof und Pumpenschacht (unter dem Central) im Hirschengrabentunnel bei Speisung über die beiden Fahrleitungen mit total 400 A. Es fällt auf, dass sich sowohl die Hin- wie die Rückströme ebenso symmetrisch auf die Leiter verteilen, wie die Leiter angeordnet sind. Einzig in den Schirmen der Mittelspannungskabel und deren parallelen Zusatzrückleitern in den Seitenbanketten links fliesst zusätzlich Strom zurück.

Die Bilder 5 *b1* und 5 *b2* zeigen die Verhältnisse bei Speisung über die Mittelspannungskabel. Eingespeister Strom (400 A) und Kurzschlussort waren dabei unverändert wie in den Bildern 5 *a1* und 5 *a2*. Im einzelnen ist zu erkennen:

- Bei parallelen Kabeln, die beide Strom führen, ist der Anteil des durch die beiden Schirme und Rückleiter fliessenden Rückstromes im Hirschengrabentunnel etwa gleich gross wie in Landikon, nämlich ungefähr 60–80% des im Kabel fliessenden Hinstromes. Im 100jährigen Riesbachtunnel (von Stadelhofen südwärts) ist dieser Anteil mit 82–93% wesentlich höher. Der Grund liegt darin, dass im Riesbachtunnel weniger andere Rückleiter vorhanden sind.
- Die total vier Schienen führen in den Querschnitten Florhof und Pumpe insgesamt 4–30% des speisenden Stromes als Rückstrom. Eine einzelne Schiene kommt auf maximal 12% im Vergleich zu 15% in Landikon.
- Die Erdseile führen im Hirschengrabentunnel je nach Schaltung 15–30% des speisenden Stromes zurück.
- Auffällig ist in Bild 5 *b2*, wie die stromführenden Mittelspannungskabel im Bankett links der Gleise die vier Schienenströme in ihre Nähe «ziehen».

Das Bild 5 zeigt die Problematik gut auf, welche entsteht, wenn die Hin- und Rückleiterkonfiguration innerhalb weniger hundert Meter Streckenlänge stark unterschiedlich ist. Deshalb sind allgemeine Aussagen über die Rückstromverhältnisse sehr schwierig zu machen; sie können nur im Einklang mit genauen Kenntnissen der jeweiligen örtlichen Situation erarbeitet werden.

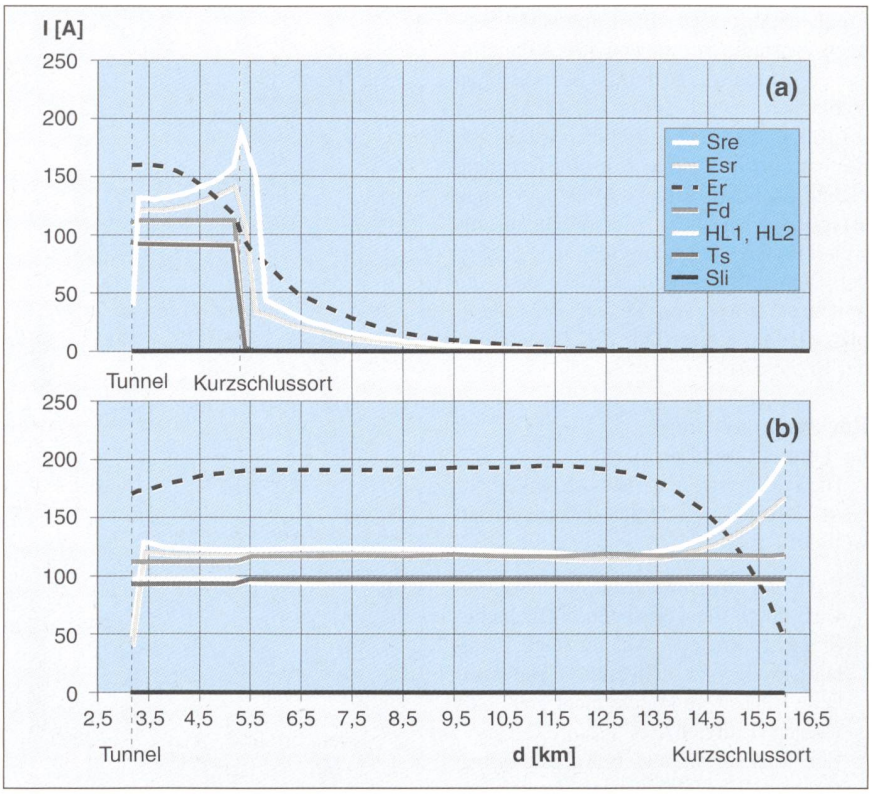


Bild 6 Mit Simnet berechnete Stromverteilung auf der Strecke Birmensdorf – Bonstetten (Tunnel)

a Speisung mit 400 A, Kurzschlussort ungefähr 2 km vom Tunnel entfernt
b Speisung mit 400 A, Kurzschlussort ungefähr 12 km vom Tunnel entfernt
Esr Erdseil rechts
Er Erde
Fd Fahrdraht
HL1, HL2 Hilfsleitung 1 (Kabel 1), Hilfsleitung 2 (Kabel 2)
Sli Schiene links
Sre Schiene rechts
Ts Tragseil

Simulationen und Berechnungen

Das Simulationsprogramm Simnet

Simnet – ein Simulationsprogramm für PC – berechnet die Ströme und Spannungen in einem Netzwerk mit parallel verlaufenden Leitern, also auf einer Bahntrasse mit Fahrdraht, Tragseil, Schienen, Mittelspannungskabel, Fernmeldekabel und weiteren leitenden Strukturen. Mit diesem Programm können Stromverteilungen in komplexen Leiteranordnungen, Fahrleitungsimpedanzen, elektromagnetische Beeinflussungen sowie Berührungs- und Schrittspannungen berechnet werden. Sowohl die Anordnungen im Bereich Hirschengrabentunnel/Stadelhofen wie auch beim Landikoner Tunnel wurden mit Simnet simuliert.

Simulationsergebnisse mit Simnet im Bereich Landikoner Tunnel

Mit den Simulationen auf dem Abschnitt Birmensdorf – Bonstetten – Mettmenstetten konnten weitgehend die in der Literatur dokumentierten Verläufe von Erd- und Rückleiterströmen gefunden werden. Bild 6 *a* zeigt die sowohl vom Kurzschlussort zum Unterwerk zurückfliessenden wie auch die in entgegengesetzter Richtung

Frequenz f	Anwendung	Grenzwerte nach [8]	
		elektrische Feldstärke	magnetische Induktion
16,7 Hz	Bahnstrom	10 kV/m	300 µT / 240 A/m
50 Hz	EVU	5 kV/m	100 µT / 80 A/m
		Grenzwerte aus [10]	
16,7 Hz	Workers	30 kV/m[1]	80/f mT = 4800 µT
	Public	10 kV/m	32/f mT = 1920 µT
50 Hz	Workers	30 kV/m[1]	80/f mT = 1600 µT
	Public	10 kV/m	32/f mT = 640 µT
		Randbedingungen für Feldberechnungen, nach [13]	
16,7 Hz	Belastung	17,25 kV (1,15 · U_{nenn})	2000 A_{eff}

Tabelle I Grenzwerte für die magnetische und elektrische Feldstärke aus verschiedenen Normen
[1] zusätzliche Bedingungen beachten

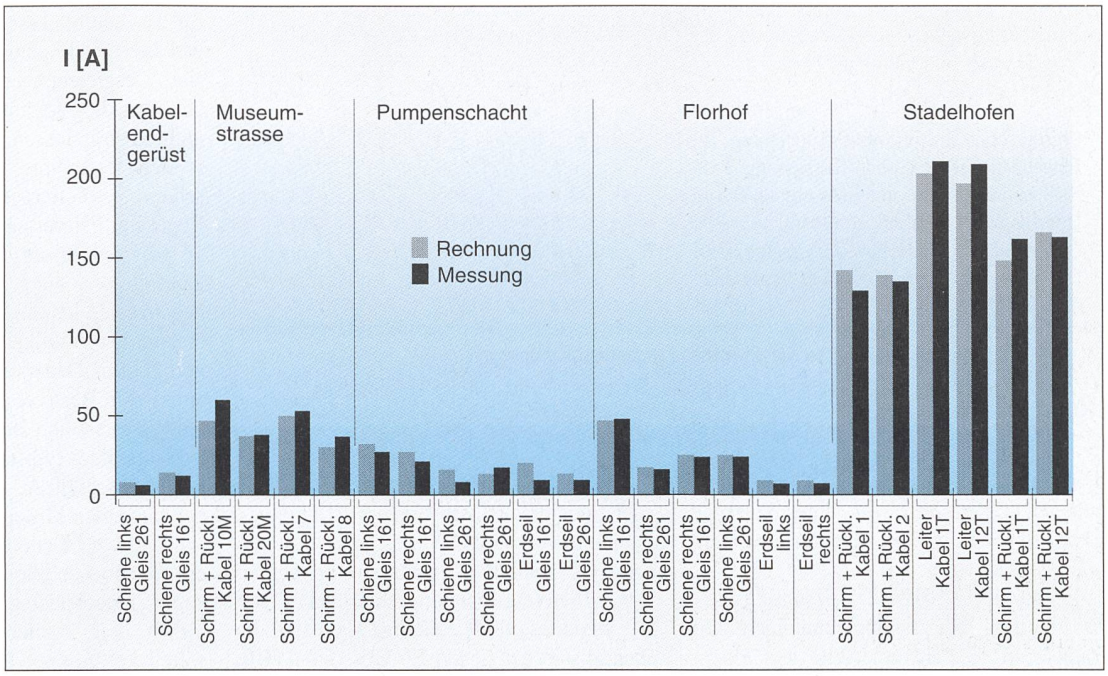


Bild 7 Vergleich zwischen Messungen und Berechnungen

I gemessene und mit Simnet berechnete Ströme im Hirschengrabentunnel, bei Speisung mit 400 A

fliessenden Ströme. Die ungefähr gleichmässige Aufteilung des Rückstromes auf die wichtigsten Rückleiter wie Schiene, Erdseil und Erde sind hier gut erkennbar. Im Bild 6 *b* ist zu sehen, dass sich die Ausgleichsströme und der Aufbau des Erdstromes in diesem Fall über mehrere Kilometer erstrecken. Natürlich kann der resultierende Erdstrom nicht messtechnisch erfasst werden. Da jedoch die übrigen gemessenen Leiterströme gut mit den Ergebnissen der Simulation übereinstimmen, können auch gezielte Rückschlüsse auf den Erdstrom gezogen werden. Die Aussagen dieser Simulationen können als sehr gut beurteilt werden, da die im Tunnelbereich gemessenen Vergleichswerte im Bereich von einigen Ampere übereinstimmen und die Veränderungen der Messparameter auch bei der Simulation gleich reagieren.

Simulationsergebnisse mit Simnet im Hirschengrabentunnel

Ganz im Gegensatz zu den Ergebnissen im Landikoner Tunnel zeigen sowohl die Simulation wie auch die Messergebnisse auf dem Abschnitt Zürich-Museumstrasse bis Stadelhofen völlig andere Verhältnisse: nämlich abrupte Änderungen der Rückstromverteilung bei den Übergängen Freileitung – Kabel und Fahrleitung – Kabel. Der Anteil des Erdstromes ist vergleichsweise klein und ändert über die betrachtete Tunnelstrecke wenig. Der Grund liegt einerseits in der geringen Erdfühligkeit des gesamten Bauwerkes und andererseits in der guten Längsleitfähigkeit der stark vermaschten Bahn- und Bauwerkserde.

Vergleich der Simulationsergebnisse mit Messergebnissen

Trotz der sehr komplexen Rückstromführung – insbesondere im Hirschengrabentunnel – zeigen die Vergleiche von Messungen und Simulationen eine klare und erfreulich genaue Übereinstimmung (Bild 7). Mit diesem Simulations-Tool können somit bereits im Projektstadium ausreichend genaue Aussagen über die Stromverteilungen gemacht werden, welche später nach der Ausführung nur noch stichprobenweise überprüft werden müssen. Damit können die aufwendigen, grossräumigen und damit schwierig durchzuführenden Messungen entfallen. Insbesondere bei verschiedenen neu projektierten und erstellten Kunstbauten von Bahn 2000 (Grauholztunnel, Adlertunnel) und Gotthard-Basistunnel (siehe auch Bild 9) wurden diese neuen Möglichkeiten bereits mit Erfolg angewendet.

Berechnungen von Feldern im Bereich der 15-kV-Bahnstromanlagen

Der besondere Aspekt von Bildschirmbeeinflussungen durch 16,7-Hz-Felder wurde bereits früher in [5] angesprochen. Heute stösst die Diskussion über alle Beeinflussungsfragen auf grösstes öffentliches Interesse. Als wichtige zurzeit in der Schweiz angewendete Grenzwerte stehen in [8] die sogenannten Irpa-Werte, wie sie in der Tabelle I aufgeführt sind. Bei der Einhaltung dieser Werte ist nach heutigem Kenntnisstand nicht mit schädlichen Einwirkungen auf den Menschen zu rechnen. Zu beachten ist dabei, dass die ange-

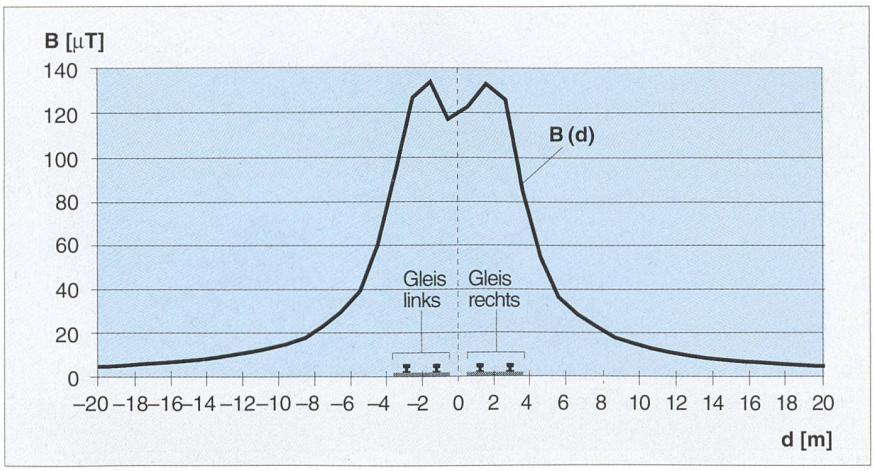


Bild 8 Verteilung der magnetischen Induktion an einer doppelspurigen Strecke (Simulation)

Feldverteilung *B(d)* für R-Fl, Doppelspur, mit Erdseil. Weitere Angaben: Speisestrom 2000 A, Lokstandort km 12 000 (fern).

Fahrleitungsanordnung R-Fahrleitung (R = Tragseil und Fahrdraht beweglich nachgespannt)	Induktion[1] [µT]	Irpa-Wert gemäss [8] [µT]
Einspur ohne Erdseil, ohne Hilfsleitung, R 140	20,2	300
Einspur mit Erdseil, ohne Hilfsleitung, R 140	14,6	300
Einspur mit Erdseil, mit Hilfsleitung, R 140	18,8	300
Doppelspur mit Erdseil, R 140	10,5	300
Doppelspur mit Erdseil, R 230 (Bahn 2000)	10,4	300
Doppelspur mit Erdseil, mit Feeder, R 230 (Bahn 2000)	11,4	300

Tabelle II Magnetische Induktion bei verschiedenen Fahrleitungsanordnungen

Simulationsergebnisse und Vergleich mit den zulässigen Grenzwerten; Hinstrom in der Fahrleitung 2000 A_{eff}

[1] magnetische Induktion 1 m über Schienenoberkante und 10 m von der Gleisachse entfernt

gebenen Grenzwerte für eine dauernde Exposition des ganzen Körpers in einem homogenen Feld gelten.

In der ENV 50121-2 [13] wird spezifiziert, dass bei Feldberechnungen mit Bahnstrom 16,7 Hz einerseits von einem Leiterstrom von 2000 A (Effektivwert) oder andererseits von einer Fahrleitungsspannung von 17,25 kV, das heisst von der nach CEI maximal zulässigen Spannung von 1,15×Nennspannung, auszugehen ist. Im weiteren sind zulässige Feldstärken ebenfalls in der neuen ENV 50166-1 [10] dargestellt. Zurzeit ist noch etwas schwierig zu überblicken, welche Werte unter welchen Bedingungen nun anzuwenden sind. Desgleichen sind auch die Diskussionen über die zugehörige Messtechnik noch nicht abgeschlossen.

Der Spannungswert von 17,25 kV scheint zweckmässig, da die SBB in der Regel die Fahrleitungen ab Unterwerk mit 16,5 kV einspeisen. Im Schwachlastbetrieb kann die Spannung in Unterwerksnähe bis gegen 17,25 kV ansteigen. Dagegen bestehen bei der Praktikabilität des Stromwertes von 2000 A Dauerstrom gewisse Fragezeichen: zum Beispiel zeigt der Stromverlauf eines im S-Bahn-Betrieb stark belasteten Speisepunktes typische kurze Stromspitzen bis gegen 3000 A, rasche Stromänderungen und einen Mittelwert von rund 1200 A. Ein typischer Dauerstrom von 2000 A und ein entsprechend homogenes Feld sind hier kaum zu beobachten.

Mit dem vorher beschriebenen Softwarepaket Simnet können die Hin- und Rückstromverteilungen in den einzelnen Leitern berechnet werden. Anschliessend können daraus die resultierenden Feldstärken berechnet werden. Das resultierende Magnetfeld wird bei der Hinleitung durch die Stromaufteilung zwischen Tragseil und eigentlichem Fahrdraht je nach verwendetem Material (Leitfähigkeit und Querschnitt) beeinflusst. Auf Einspurstrecken wird oft eine Hilfsleitung montiert, welche einen zusätzlichen Stromfluss parallel zur Fahrleitung ermöglicht. Auf Hochleistungsstrecken reicht der Querschnitt von Tragseil und Fahrdraht nicht für eine genügende Stromtragfähigkeit, so dass zusätzlich – wie bei Gleichstrombahnen üblich – ein sogenannter Feeder montiert wird. Bei der Stromrückführung ist vor allem das Erdseil für eine Reduktion der Feldstärken von Bedeutung. Da die Rückstromführung beim Triebfahrzeug mit dem Stromübergang Rad – Schiene beginnt, sind im Nahbereich des Triebfahrzeugstandorts leicht andere Feldstärken festzustellen. Eine typische Feldverteilung (magnetische Induktion) auf einem Doppelspurabschnitt mit R-Fahrleitung auf der freien Strecke ist in Bild 8 dargestellt.

In Tabelle II sind verschiedene Werte der magnetischen Induktion bei 2000 A entsprechend [13] für verschiedene typische Fahrleitungsanordnungen, wie sie bei den SBB vorkommen, zusammengestellt. Die Werte zeigen, dass die Leiteranordnungen entsprechend ihrer geometrischen Lage die resultierende Magnetfeldstärke bestimmen. Es zeigt sich auch, dass die Werte – gegeben durch die aufgabenbedingte Grundkonstruktion der Fahrleitungsanlage – nur in relativ engen Grenzen variieren. Sämtliche berechneten Werte liegen – trotz des hohen Stromwertes von

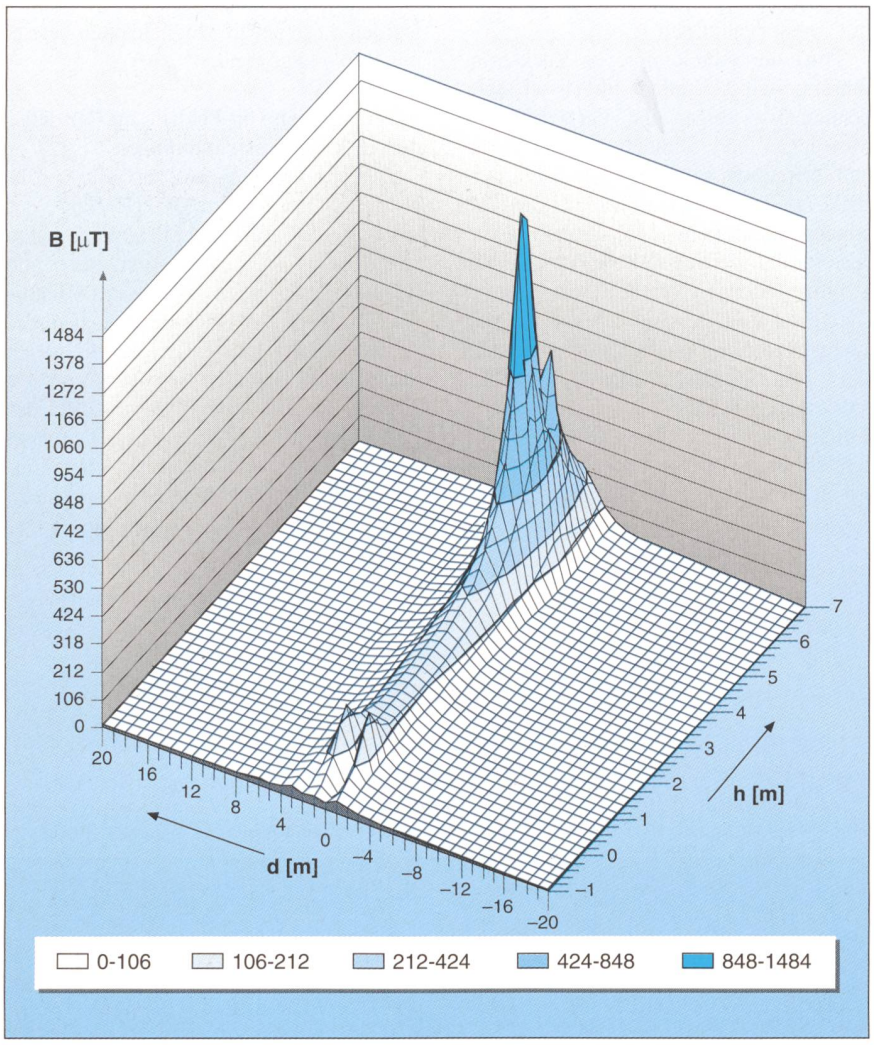


Bild 9 Verteilung der magnetischen Induktion im Gotthard-Basistunnel bei Vollbetrieb (Simulation)

B magnetische Induktion
d Abstand von der Gleisachse Ost
h Höhe über Schienenoberkante

2000 A – deutlich unter den Werten der Tabelle I. Wird der Wert noch auf die heute üblichen Stromwerte von ungefähr 500 A reduziert, so kann festgestellt werden, dass die Werte um Grössenordnungen unter dem heute zulässigen maximalen Wert von 300 µT oder 240 A/m liegen.

In Bild 9 wird der Verlauf der magnetischen Induktion dreidimensional dargestellt. Die simulierten Verhältnisse entsprechen dem Strom in einer der beiden Einspurröhren des zukünftigen Gotthard-Basistunnels bei Vollbetrieb. In dieser Darstellung ist auch ersichtlich, wie die in grossem Masse an der Stromrückführung beteiligten Schienen die Feldverteilung beeinflussen.

Erste Messungen der Magnetfelder an bestehenden Anlagen zeigen auch für diesen Programmteil eine gute Übereinstimmung der Simulationsergebnisse mit den tatsächlichen Werten. Die Feldmessungen mit handelsüblichen Messgeräten für vektorielle Feldstärkeerfassung sind einfach durchzuführen und auszuwerten. Aufwendig ist nach wie vor jeweils die Erfassung der am Messort wirkenden Stromstärken, insbesondere bei dichtem Zugbetrieb. Für exakte Ergebnisse müssen weiterhin in den nächtlichen Betriebspausen Messungen mit eingeprägten, konstanten Strömen ab Umformer- oder Kraftwerk durchgeführt werden.

Fazit

In den letzten Jahren wurden verschiedene Engineering-Tools zur 15-kV-Bahnstrom-Berechnung – eigentlicher Laststrom pro Streckenabschnitt, Stromverteilung auf die verschiedenen Hin- und Rückleiter sowie neustens die Magnetfeldverteilung – entwickelt. Nach aufwendigen Verifikationsmessungen, welche eine gute Übereinstimmung Messung – Rechenresultate zeigten, stehen diese Instrumente nun abgesichert zur Verfügung, um neue Anlagen in diesem Fachgebiet mit überblickbarem Aufwand zu projektieren. Sowohl Mess- wie auch Simulationsergebnisse zeigen, dass die heute zur gezielten Rückstromführung getroffenen Massnahmen zweckmässig sind. Es müssen nur noch punktuell, bei besonderen Situationen, weiterführende Massnahmen ergriffen werden. Im Bereich der Berührungs- und Schrittspannungen können die Werte mit Reserven eingehalten werden. Bei den Feldstärken werden sogar die gegenüber den vorgeschlagenen EN-Werten noch niedrigeren Irpa-Werte deutlich unterschritten.

Literatur

[1] Bundesgesetz betreffend die elektrischen Schwach- und Starkstromanlagen vom 24. Juni 1902. SR 734.0 «Elektrizitätsgesetz».

[2] Verordnung über elektrische Anlagen von Bahnen (VEAB) vom 5. Dezember 1994. SR 734.42.

[3] Verordnung über elektrische Niederspannungsinstallationen (NIV) vom 6. September 1989. SR 734.27.

[4] Richtlinien zum Schutz gegen Korrosion durch Streuströme von Gleichstromanlagen. SEV-Korrosionskommission Dok. C3, d, Ausgabe 1996.

[5] *A. Egloff* und *M. Pauling:* Störungen auf EDV-Bildschirmen als Folge magnetischer Wechselfelder. Bull. SEV/VSE 78(1987)5, S. 251–255.

[6] Bahnanwendungen – Ortsfeste Anlagen; Teil 1: Schutzmassnahmen in bezug auf elektrische Sicherheit und Erdung. prEN 50122-1 (deutsche Fassung von Februar 1996).

[7] Verordnung über elektrische Starkstromanlagen (Starkstromverordnung) vom 30. März 1994. SR 734.2.

[8] Biologische Wirkungen elektromagnetischer Felder; 2. Teil: Frequenzbereich 10 Hz bis 100 kHz. Buwal-Schriftenreihe Umwelt Nr. 214, 1993.

[9] Biologische Auswirkungen elektromagnetischer nichtionisierender Strahlung auf den Menschen und seine Umwelt; 1. Teil: Frequenzbereich 100 kHz bis 300 GHz. Buwal-Schriftenreihe Umwelt Nr. 121, 1991.

[10] Human Exposure to Electromagnetic Fields – Low Frequency (0 Hz to 10 kHz). ENV 50166-1 (English version from January 1995).

[11] Human Exposure to Electromagnetic Fields – High Frequency (10 kHz to 300 Ghz). ENV 50166-2 (English version from January 1995).

[12] Railway Applications – Electromagnetic Compatibility; Part 1: General. ENV 50121-1 (English version from February 1996).

[13] Railway Applications – Electromagnetic Compatibility; Part 2: Emission of the Whole Railway System to the Outside World. ENV 50121-2 (English version from February 1996).

[14] Railway Applications – Electromagnetic Compatibility; Part 3-1: Rolling Stock – Train and Complete Vehicle. ENV 50121-3-1 (English version from February 1996).

[15] Railway Applications – Electromagnetic Compatibility; Part 3-2: Rolling Stock – Apparatus. ENV 50121-3-2 (English version from February 1996).

[16] Railway Applications – Electromagnetic Compatibility; Part 4: Emission and Immunity of the Signalling and Telecommunications Apparatus. ENV 50121-4 (English version from February 1996).

[17] Railway Applications – Electromagnetic Compatibility; Part 5: Fixed Power Supply Installations. ENV 50121-5 (English version from February 1996).

[18] *G. Hejda, P. Kleiner, H. P. Rubi* und *G. Rutishauser:* S-Bahn-Technik: Gleisoberbau und Körperschallschutzmassnahmen. Schweizer Ingenieur und Architekt 109(1991)29, S. 701–706.

Cheminement contrôlé du courant de traction de retour

Conditions de mise à la terre et champs magnétiques des installations ferroviaires monophasées

Dans les installations ferroviaires monophasées les puissances de traction croissantes génèrent des exigences toujours plus rigoureuses à un cheminement contrôlé du courant de traction de retour. Avec les courants de retour et d'aller transitant séparément (fig. 1) se posent en effet de nombreuses questions d'interférences qui depuis peu doivent subir un traitement unitaire dans les normes européennes. De nouvelles méthodes de calcul et de simulations ainsi que les résultats de vastes mesures en service permettent aujourd'hui une appréciation univoque des différentes conditions de courant de retour et de champs magnétiques – avant tout importantes dans les régions sises à proximité d'installations ferroviaires et présentant souvent une grande densité démographique. Cela permet de prendre des mesures optimales et adaptées à la situation.

A l'exemple de la nouvelle ligne du RER Zurich (fig. 2), l'article décrit les problèmes et solutions qui reflètent l'état de la technique actuelle. Y sont représentées les expériences tirées de la planification et de l'exploitation de vastes simulations et mesures (fig. 2–9). Dans le cas du tunnel Hirschengraben, les résultats des simulations et des mesures ont été comparés en détail; malgré un cheminement très complexe du courant de retour, on obtient une concordance claire et étonnamment bonne (fig. 7). Dans l'ensemble les résultats des simulations et des mesures montrent que les précautions prises pour un cheminement contrôlé du courant de retour sont appropriées. Au niveau des tensions de contact et de pas, on peut respecter les valeurs limites avec réserve valables; concernant les intensités de champs on est même largement en dessous des valeurs Irpa, elles-mêmes encore plus basses que les valeurs proposées par les normes européennes.

ANSON liefert

Deckenventilatoren
für Fabrik- und Lagerhallen. Durchmischen die Raumluft. Verhindern Wärmeschichtungen. Sparen massiv Heizkosten. 220 V/70 W. Regelbar 0—220 U/min. 15000 m³/h. Rasch montiert. Beratung u. Offerte von:

ANSON liefert

Ventilatoren mit Wärmerückgewinnung
für Fenster-, Mauer-, Decken- oder Dachmontage. 200—12000 m³/h. Sehr leiser Lauf. Wirkungsgrad bis 65%. Rufen Sie uns an:

energiesparende Luftvorhänge für Eingangs-Türen und Industrietore
verhindern Durchzug und sparen massiv Heizkosten. Im Sommer kein Eindringen von Aussenluft. Einfach einzubauen. Wir beraten Sie unverbindlich. Fragen Sie an:

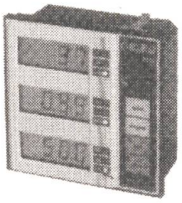
ANSON AG 01/461 11 11
8055 Zürich Friesenbergstrasse 108

. . . spart Heizkosten!

CVM-Powermeter

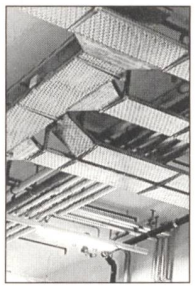
Ersetzt 30 konventionelle Messinstrumente

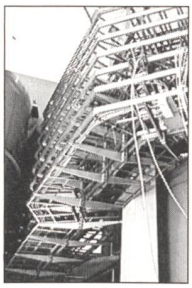
- **Misst, berechnet genau**
  Spannung, Strom,
  Wirk-, Schein-, Blindleistung
  Leistungsfaktor, etc.
- **Programmierbar**
  Impuls/Analogausgang
- **Doppeltarif / Leistungsmaxima**

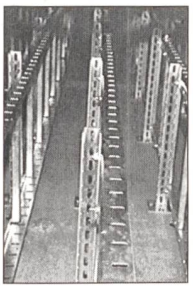


ELKO SYSTEME AG

Messgeräte • Systeme • Anlagen zur Kontrolle und Optimierung des Verbrauches elektrischer Energie
Haldenweg 12 CH 4310 Rheinfelden
Tel. 061-8315981 Fax 061-8315983







Feuerverzinkte Kabelbahnen Multibahnen Kabelpritschen und Steigleitungen

Feuerverzinkt — das gute und preisgünstige Schweizer Kabelträgersystem NEU auch feuerverzinkt nach DIN 50976 lieferbar.

- **NEU: MULTIBAHNEN, Kabelbahnen und Kabelpritschen feuerverzinkt — 3 m oder 6 m Länge für grössere Abhängedistanzen und raschere Montage**
- **NEU Deckenstützen und Konsolen schwer**
- **Steigleitungen — NEU noch montagefreundlicher**

Beratung, Angebot, preisgünstige und rasche Lieferung von Ihrem Elektrogrossisten und von
lanz oensingen 062/388 21 21 Fax 062/388 24 24

☐ **Die feuerverzinkten LANZ Multibahnen Kabelbahnen, Kabelpritschen und Steigleitungen** interessieren mich. Bitte senden Sie mir Unterlagen.

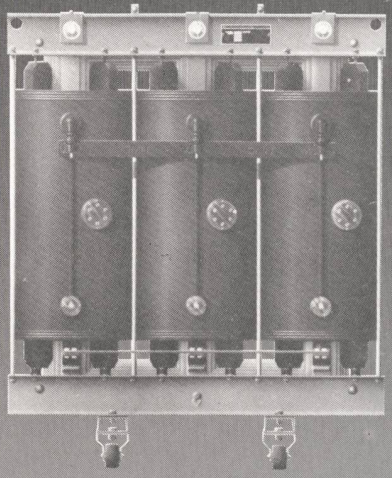
☐ Könnten Sie mich besuchen? Bitte tel. Voranmeldung!
Name/Adresse/Tel.: _____

11

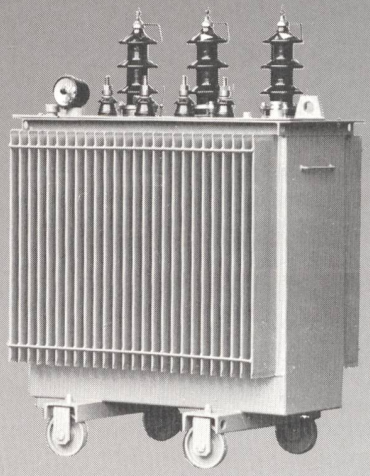
lanz oensingen ag
CH-4702 Oensingen · Telefon 062 388 21 21

Unsere Transformatoren

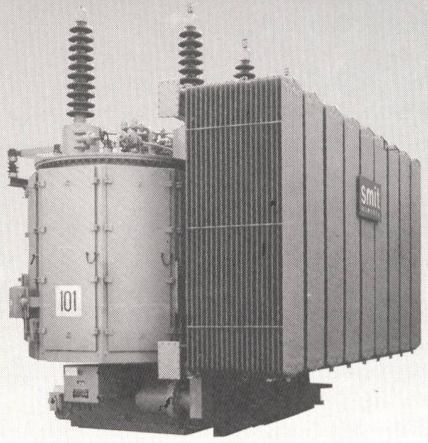
Giessharz-Netztransformatoren



Oel-Netztransformatoren



Grosstransformatoren



Unsere Produkte sind nicht nur preisgünstig, auch die Verluste werden optimiert. Wir unterbreiten Ihnen gerne ein Angebot.

ELTAVO Walter Bisang AG
Elektro- und Industrieprodukte
CH-8222 Beringen/Schaffhausen
Tel. 052/685 31 81/Fax 052/685 31 52

eltavo