

Aspekte der EMV im Bereich der SBB

Autor(en): **Pauling, Manfred**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association Suisse des Electriciens, de l'Association des Entreprises électriques suisses**

Band (Jahr): **83 (1992)**

Heft 11

PDF erstellt am: **10.07.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-902834>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Aspekte der EMV im Bereich der SBB

Manfred Pauling

Aus technisch-physikalischen Gründen führt der normale Betrieb einer elektrischen Bahnstrecke zu vergleichsweise ausgeprägten galvanischen und induktiven Beeinflussungen. Wenn auch neuere Bauformen und Ergänzungen der ortsfesten Bahnanlagen sowie eine moderne Steuerungstechnik bei den Fahrzeugen heute bereits stark zur Störungsabschwächung beitragen, muss der elektromagnetischen Verträglichkeit (EMV) dennoch besondere Beachtung geschenkt werden. Vorkehrungen, welche bei den SBB zur Anwendung kamen, werden im vorliegenden Aufsatz dargelegt.

Pour des raisons techniques et physiques, l'exploitation normale d'une ligne de chemin de fer électrique induit des perturbations galvaniques et inductives notablement plus marquées. Quand bien même les nouvelles formes d'exécution et compléments des emprises fixes du chemin de fer ainsi que les systèmes de commande modernes embarqués contribuent déjà aujourd'hui à réduire fortement les perturbations, une attention particulière à la compatibilité électromagnétique (CEM) est nécessaire. Des mesures prises par les CFF sont présentées dans cet article.

Adresse des Autors

Manfred Pauling, Dipl. El.-Ing. ETHZ,
Baudirektion SBB, Elektrische Anlagen,
Mittelstrasse 43, 3030 Bern.

Der einphasige Bahnstromkreis

Die grundlegenden Erkenntnisse zum einphasigen Bahnstromkreis werden ausführlich bereits in [1] beschrieben.

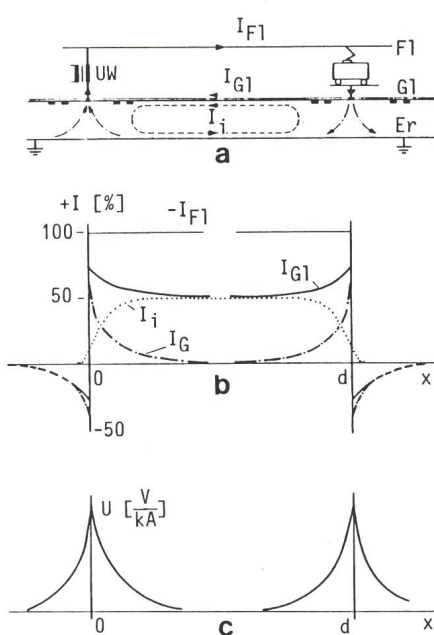


Bild 1 Rückströme und Potentiale beim einphasigen Bahnstrom-Kreis

- a Ströme der elektrischen Bahnstrecke
- b Der Rückstrom und seine Komponenten
- c Potentialverlauf gegen neutrale Erde
- UW Unterwerk
- Fl Fahrleitung
- Gl Gleis
- Er «Erde»
- I_{Fl} Fahrleitungsstrom
- I_{Gl} Gleisstrom
- I_i Induzierter Anteil von I_{Gl}
- I_G Galvanischer Anteil von I_{Gl}
- I Ströme, in Prozent des Fahrleitungsstromes
- U Gleispotential gegen ferne Erde
- x Position gegenüber Unterwerk
- d Entfernung des Triebfahrzeugs vom Unterwerk

ben. Demnach kann der Gleis-Erde-Kettenleiter einer Bahnstrecke mit der Fahrleitung als galvanisch und induktiv gekoppelt betrachtet werden. In Bild 1 sind die Verhältnisse qualitativ dargestellt, wenn sich das strombeziehende Triebfahrzeug etwa 10–12 km vom speisenden Unterwerk entfernt befindet. Der Gleisstrom, der sich allgemein aus einem galvanischen und einem induzierten Anteil zusammensetzt, kann die Grösse des Fahrleitungsstroms nicht erreichen (Bild 1, b). Das Potential des Gleises gegen ferne (neutrale) Erde wird vom galvanischen Anteil, das heisst vom «echten» Rückstrom, bestimmt. Daher ist der Potentialverlauf längs des Gleises ein Abbild dieses Anteils (Bild 1, c). Sein Maximalwert tritt beim Unterwerk und beim Triebfahrzeug auf und wird oberhalb einer Mindestdistanz von 3–6 km zwischen beiden unabhängig von dieser Distanz. Die Distanz ist von der Erdfähigkeit der Gleisanlage abhängig, worüber [2] detaillierte Angaben macht. Nach Messungen an SBB-Strecken ergaben sich folgende Werte:

- zweigleisige Strecke 23–53 V/kA
- mittlere Bahnhöfe 15–36 V/kA
- eingleisige Strecke (ohne Erdseil) 80–90 V/kA

Die Werte wurden grösstenteils im Kurzschlussversuch ermittelt.

Beeinflussungen durch die Grundwelle 16 2/3 Hz

Gleispotentiale – eine Gefährdung?

Quer zum Gleis fällt das Potential sehr rasch ab. Einen quantitativen Hinweis gibt Bild 2, das [3] entnommen ist und mit Messungen im SBB-Netz gut übereinstimmt. Die daraus

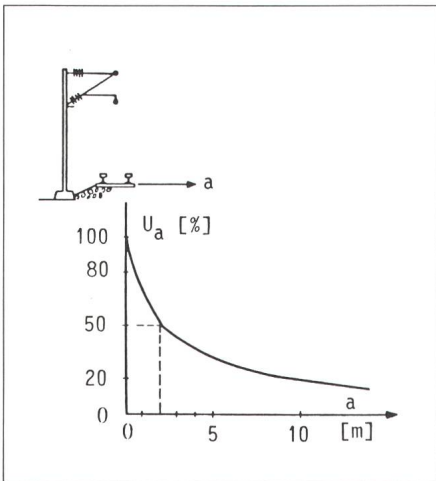


Bild 2 Potentialverlauf quer zum Gleis
 U_a Potential gegen ferne Erde, in Prozent des Gleispotentials
 a Abstand von Gleis

abgeleiteten Massnahmen können wie folgt formuliert werden:

1. Das Gleispotential ist nicht über Metallstrukturen in bahnfremde Gebiete (insbesondere der Öffentlichkeit zugängliche) zu verschleppen.
2. Metallische Einbauten im Publikumsbereich der Bahn sind in einen Potentialausgleich einzubeziehen und bahnzuerden.

Punkt 1 beinhaltet u.a., dass der PEN-Leiter eines von aussen eingeführten Niederspannungsnetzes im Regelfall nicht bahngeerdet wird, PTT-Leitungen über Isolierübertrager oder «isoliert» in Bahnanlagen eingeführt und metallische Rohrleitungen mittels Isolierstoss getrennt werden. Ausführlich werden diese Bestimmungen in [4] enthalten sein. Wo diese Grundsätze eingehalten werden, ist nicht mit einer Gefährdung zu rechnen.

Induktionwirkungen durch den Bahnbetrieb

In bezug auf Induktionwirkungen ist die physikalische Ausgangslage einer elektrischen Wechselstrom-Bahn grundsätzlich verschieden von jener der Dreiphasen-Landesversorgung 50 Hz. Die Gegenüberstellung (Bild 3) soll dies verdeutlichen: Das nicht kompensierte Magnetfeld breitet sich naturgemäss bei Bahnanlagen über grössere Distanzen aus als bei Übertragungsleitungen der 50-Hz-Landesversorgung mit vergleichbaren Leistungen.

Die Grössenordnung wird durch folgendes Beispiel abgeschätzt: Bei ei-

nem Fahrleistungsstrom von 500 A kann in genügend grosser Entfernung d von der Bahnstrecke in der Mitte zwischen Einspeisung und Verbraucher – siehe Bild 1 – mit einem nicht kompensierten induzierenden Strom von rund 250 A gerechnet werden. Befindet sich der Messort in einer Distanz $d = 20$ m von der Gleisachse entfernt, wird das Magnetfeld:

$$H = 250 \text{ A} / 2\pi \cdot 20 \text{ m} = 2 \text{ A/m}$$

Bildschirme von EDV-Anlagen ohne Abschirmung werden bei dieser Feldstärke bereits empfindlich gestört. Bei kleineren Distanzen steigt die Feldstärke überproportional an, da die Feldkomponenten von Fahrleistungs- und Rückstrom nicht mehr (annähernd) gegenphasig sind.

In diesem Fall bleibt als Lösung nur noch die Abschirmung durch μ -Metall-Gehäuse, die heute mit genügenden Dämpfungswerten erhältlich sind, oder, ökonomischer, die Verwendung von Bildschirmen mit abgeschirmter Bildröhre. Die Abschirmungen verhindern auch die gegenseitige Störung von Bildschirmen, die Seite an Seite aufgestellt sind.

Telekommunikationskabel bauen eine Längsspannung auf, wenn sie in geringem Abstand längs der Bahnstrecke verlegt sind. Durch spezielle Konstruktion der Kabelschirme und deren beidseitige beziehungsweise mehrfache Erdung gelang es in der Vergangenheit, gute (das heisst kleine) Reduktionsfaktoren zu erzielen. Die Längsspannung auf (erdfreien) Aderpaaren konnte in der Grössenordnung von 70–80% gegenüber «ungeschützten» Adern gesenkt werden. Neue Fernverbindungen werden bei den SBB nur noch in Glasfasertechnik erstellt.

Fernsteuerkabel für Distanzen < 1 km werden bei den SBB auch ohne Reduktionsschutz verwendet, um Kosten zu senken und Potentiale nicht über einen Metallmantel zu verschlep-

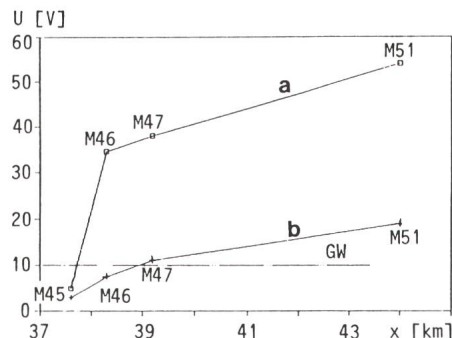


Bild 4 Gemessene Potentiale auf der Gasleitung Rhonetal

- a normal
- b bei beidseitiger Erdung von 2 zusätzlichen Doppelleitern auf gleichem Mastbild
- U Effektivwert der gemessenen Wechselspannung
- GW empirischer Grenzwert für progressiv einsetzende Korrosion
- x Standortskoordination

pen. Voraussetzung ist der erdfreie Betrieb der zu verdrehten Aderpaare und – nötigenfalls – ein zweckmässiger Überspannungsschutz. Relevanter Beanspruchungsfall ist ein Kurzschluss auf der Bahnstrecke.

Die *Wechselstromkorrosion* auf Rohrleitungen parallel Bahnstrecken ist ein ganz neues Phänomen, das in den letzten 3 bis 4 Jahren in Erscheinung getreten ist. Die aus Korrosionsschutzgründen ständig verbesserte Aussenisolation (kathodischer Schutz, Fortschritte der Kunststoffchemie) hat die Erdfähigkeit solcher Leitungen herabgesetzt. Damit kann das unkompenzierte H-Feld Induktionsspannungen wie an einer ungeschützten Kabelader erzeugen. Bei kleinen, unvermeidbaren Leckstellen in der Isolation können Stromdichten auftreten, die den kritischen Wert von 30–40 A/m² überschreiten und damit zu lochfrassartiger Korrosion führen. Bild 4 zeigt gemessene Wechselspannungsverläufe der Gasleitung Rhonetal gegen ferne Erde. Als ein empirischer Grenz-

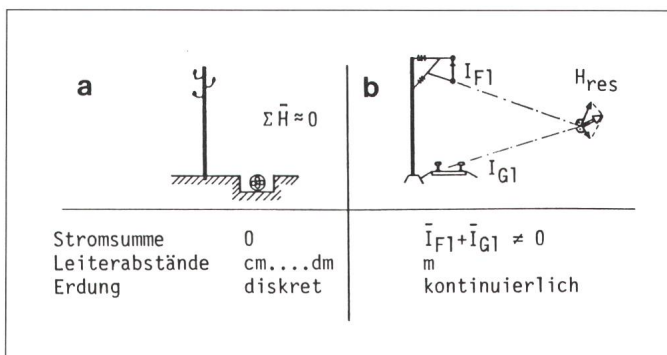


Bild 3 Entstehung magnetischer Störfelder im Vergleich

- a 50-Hz-Landesversorgung
- b elektrische Wechselstrombahn
- I_{F1} Fahrleistungsstrom
- I_{G1} Gleisstrom
- H Magnetfeld

wert für die progressiv einsetzende Korrosion wird zurzeit 10 V Wechselspannung betrachtet.

Als aussichtsreichste Abhilfemaßnahme kommt ein parallel zur Rohrleitung verlegtes Erdband in Betracht, an das die Rohrleitung über Polarisationszellen nach Kirk angeschlossen wird. Diese stellen elektrolytische Plattenkondensatoren dar. Der Elektrolyt besteht aus einer Kaliumhydroxid-Lösung.

Störungsverminderung – Massnahmen durch die SBB

In den vergangenen Jahren und Jahrzehnten haben die SBB beim Ausbau ihrer Bahnanlagen zahlreiche Massnahmen getroffen, die dazu beitragen, die beschriebenen Störbeeinflussungen zu vermindern (siehe Bild 5). Ob-

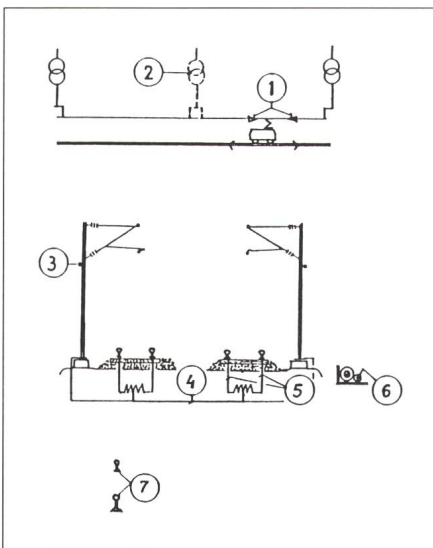


Bild 5 Massnahmen der SBB zur Störungsverminderung

- 1 zweiseitige Speisung
- 2 Zwischenunterwerk
- 3 Erdseile
- 4 Gleisquerverbinder
- 5 symmetrische Schienenstromkreise
- 6 separater Rückleiter
- 7 schwerere Schienenprofile

wohl diesen Massnahmen meistens nicht die Absicht zugrunde lag, die EMV zu verbessern, wirken alle in die gleiche, erwünschte Richtung. Physikalisch gesehen werden 3 Effekte genutzt:

- Verkleinerung des Fahrleitungsstroms und Übertragung über geringere Distanzen durch
 - Verbundbetrieb der Unterwerke (beidseitige Speisung der Strecken) und
 - Bau von Zwischenunterwerken (der Bau der hierzu nötigen Über-

tragungsleitungen wird leider zunehmend schwieriger).

- Verkleinerung der Rückleitimpedanz durch
 - schwerere Schienenprofile (auf Hauptstrecken heute UIC 60)
 - Einsatz symmetrischer oder quasysymmetrischer Schienenstromkreise
 - Querverbinden der Gleise einer Doppelspur
 - Verwendung von Erdseilen.
- Nutzung des Kompensationseffekts durch
 - Erdseilaufhängung in Fahrleitungshöhe
 - Mitführung eines Rückstromleiters unmittelbar neben 15-kV-Speise- und Umgehungskabeln.

Zu erwähnen ist noch, dass bei den Schwedischen Staatsbahnen (SJ) Saugtransformatoren verwendet werden. Diesbezügliche Versuche fanden in den Zwanzigerjahren auch in der Schweiz statt; mit fortschreitender Elektrifizierung wurde diese Methode wieder fallengelassen.

Betrachtet man die systembedingten Gegebenheiten nach Bild 3, wird verständlich, dass die bahnseitigen Verbesserungsmöglichkeiten weitgehend ausgeschöpft sind.

Beeinflussung durch Oberschwingungen

Diese Beeinflussungsart hängt wesentlich von der (Steuerungs-)Technik der Triebfahrzeuge ab. Während die ursprüngliche Steuerungsart mit Stufenschalter am Transformator praktisch frei von störenden Oberschwingungen war, änderte sich die Situation mit der Einführung der Anschnittsteuerung, die durch die Entwicklung leistungsfähiger Netzthyristoren ermöglicht wurde. Vergleichende Messungen an verschiedenen Triebfahrzeugen dieser Bauart zeigten, dass SBB-Triebfahrzeuge mit vierstufiger Steuerung und Kommutierungs-drossel das vergleichsweise niedrigste Störniveau aufwiesen. Im weiteren hatte das im vorstehenden Abschnitt erwähnte Erdseil auch die Wirkung, dass Oberschwingungsströme bevorzugt über dieses flossen (engere Kopplung zum Fahrleitungsstrom), so dass die Schienen zum Teil entlastet wurden. Die Beeinflussung fernmelde- und signaltechnischer Anlagen erforderte dennoch besondere Massnahmen (spezielle Kabelkonstruktion-

nen bzw. symmetrische Gleisstromkreise).

Fortschritte in der Halbleitertechnologie führten in den vergangenen 5–10 Jahren zur industriellen Fertigung leistungsfähiger löschbarer Thyristoren (GTO). Damit war die Voraussetzung geschaffen, die Umrichter-Antriebstechnik mit Drehfeldmaschinen einzuführen. Die Traktionstechnik profitiert von den Eigenschaften des Antriebswechselrichters, das Versorgungsnetz von jenen des netzseitigen Umrichters (2- oder 4-Quadranten-Steller). Dieser ermöglicht, nebst einem Leistungsfaktor von nahezu 1, bis etwa 800 Hz deutlich geringere Stromüberschwingungen als sie bei einem anschnittgesteuerten Fahrzeug auftreten (Bild 6). Störende Harmonische höherer Frequenz lassen sich mit Filtern bedämpfen. Bei modernen Tonfrequenz-Gleisstromkreisen, deren zulässige Störpegel sehr klein sind (mA–1A), wird durch geeignete Codierung dafür gesorgt, dass Fehlsprechungen vermieden werden.

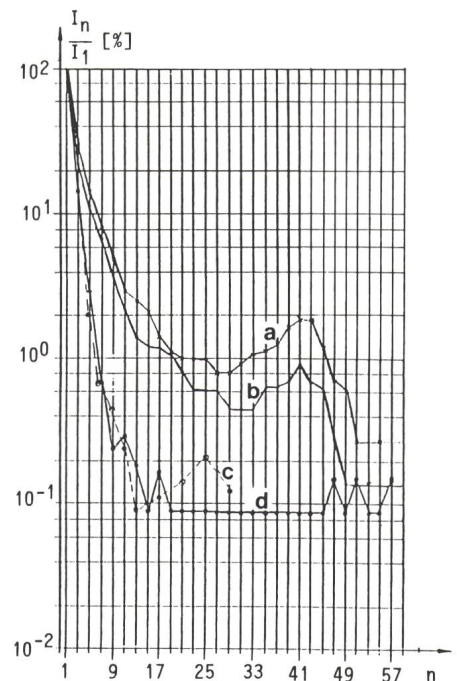


Bild 6 Frequenzspektren des Fahrstromes Vergleich der auf die Grundwelle bezogenen Frequenzspektren des Fahrstromes von verschiedenen Triebfahrzeugen

- I_n Amplitude der Oberschwingung n ter Ordnung des Fahrleitungsstromes I_{Fl}
- I_1 Amplitude der Grundschwingung des Fahrleitungsstromes I_{Fl}
- n Ordnungszahl der Oberschwingung
- a Triebfahrzeug: Te IV; $I_1 = 55$ A
- b Triebfahrzeug: RABDe 8/16; $I_1 = 237$ A
- c Triebfahrzeug: Re 4/4; $I_1 = 450$ A
- d Triebfahrzeug: Ee 6/6; $I_1 = 94$ A

Frequenzen im kHz-Bereich beeinflussen nach wie vor die mit Cu-Leitern ausgeführten Fernmeldekabel. Ihre relativ kleinen Amplituden werden von den Kabelschirmen stark gedämpft, so dass erhebliche Störungen nicht auftreten können. Neue Telekom-Fernverbindungen werden bei den SBB nur noch in Glasfasertechnik erstellt; auf diesen Strecken verschwindet die Störbeeinflussung vollständig.

Oberschwingungsbehaftete Ströme verursachen in den Übertragungsmitteln (Leitungen, Transformatoren) zusätzliche Wirkenergieverluste. Die umfassende Einführung der Abschnitt-Steuer-Technik hätte diesbezügliche Mehrverluste von einigen Prozent bedeutet; bei Fahrzeugen in Umrichtertechnik bleibt diese Verlustart bedeutungslos.

Radioelektrische (gestrahlte) Störungen

Als ältester bekannter Störer gilt wohl der elektrische Lichtbogen. Er ist Störsender eines breiten Frequenzspektrums, das bis über 100 MHz reicht und Störungen bei Radio- und Fernsehempfängern verursacht kann. Der offensichtlichste Entstehungsort ist der bewegte Pantograph am Fahrdrabt. Punkto Störwirkung hat sich die bei den meisten Bahnen praktizierte Paarung Kohleschleifstück auf Cu-Fahrdrabt durchaus bewährt, so dass es bei gut regulierter Fahrleitung nur noch bei Rauheifbelag zu sporadischen Störungen kommen kann.

Weitere Störquellen sind gelockerte Klemmverbindungen in stromführenden Leitern, defekte Isolatoren – seit längerem werden bei den SBB nur noch Vollkernisolatoren eingesetzt – und Kurzschlussabschaltungen. Wegen der kurzen Dauer sind letztere für Radio- und Fernsehempfang unerheblich, können aber in EDV-Anlagen zu Clock-offs führen. Beispielsweise hat sich dieser Fall im SBB-Rechenzentrum in Bern ereignet, wo der Abstand zur Fahrleitung relativ klein ist.

Nicht immer ist der Bahnbetrieb der Störungsverursacher. Um 1965 bereits wurden Fälle bekannt, bei denen der Sender Prangins die Steuer elektronik der Loks Typ Re 4/4 II bei Fahrt im Nahbereich ausser Betrieb

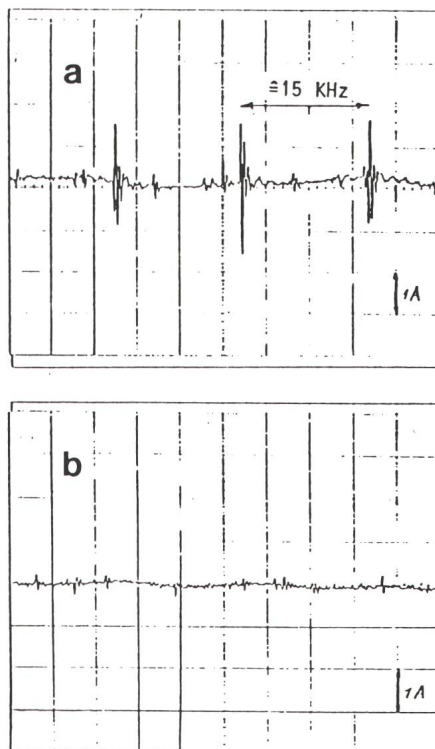


Bild 7 Stromimpulse auf einer Batterieleitung
 a vor dem Filtereinbau
 b nach dem Filtereinbau

setzte. Empfindlich gestört wurden insbesondere die Schleuderschutzeinrichtung und die Geschwindigkeitsmessung.

Kürzlich gab es bei den SBB auch Beeinflussungsfälle, die nicht bahntypisch sind, das heisst keinen Zusammenhang mit dem elektrischen Fahrbetrieb haben:

– Die gegenseitige Störung zwischen Rechereinheit (LSX 3010 im Perronbereich installiert) und dem Betriebsfunk im Frequenzbereich 410/460 MHz, bei Annäherung unter 20 m. Die Norm-Grenzwerte nach VDE 0871 wurden dabei teilweise überschritten. Die Sofortmassnahme bestand darin, die LSX in einen Faraday-Käfig einzubauen und alle nach aussen führenden Leitungen EMV-gerecht zu behandeln. In einem andern Fall konnten die Funkstörungen durch Austauschen des Bildschirms sofort behoben werden.

– In einem weiteren Beispiel wurde die Batterieanschlussleitung einer USV-Anlage über ungefähr 20 m einem Koax-Kabel (V 300) parallelgeführt. Bei Betrieb des Wechselrichters der USV-Anlage war die Einstreuung derart kräftig, dass eine Fehler-Or-

tung mit dem Impuls-Echo-Verfahren auf dem Kabelnetz nicht mehr möglich war. Die gewünschte Verbesserung brachte der Einbau eines einphasigen Netzfilters in die Batterieleitung unmittelbar ans Gehäuse des USV-Schranks. Das entsprechende Oszillogramm zeigt Bild 7. Weniger wirksam war der Einbau einer Erdungsdrossel in den Schutzleiter der Netzleitung. In einem neuen Projekt wurden abgeschirmte Batteriekabel verwendet.

Zusammenfassung

In den vorstehenden Ausführungen wird gezeigt, wie der normale Betrieb einer elektrischen Bahnstrecke, aufgrund der technisch-physikalischen Gegebenheiten, zu vergleichsweise ausgeprägten galvanischen und induktiven Beeinflussungen führt. Neuere Bauformen und Ergänzungen der ortsfesten Anlagen einerseits, moderne Steuerungstechnik bei den Fahrzeugen andererseits, tragen zur Störungsabschwächung bei. Der störungsfreie Betrieb empfindlicher Elektronikanlagen erfordert dennoch besondere Massnahmen (Abschirmungen, Verhinderung von Erdschlaufen).

Gestrahlte Störungen gehen nur sporadisch von den Versorgungsanlagen der Bahn aus. Auf die wechselseitige Störbeeinflussung von Funk- und Rechneranlagen wird hingewiesen. Vor dem Einbau leistungselektronischer Komponenten empfiehlt es sich, den Kopplungsmodus auf elektronische Nachbarsysteme mindestens qualitativ abzuschätzen und EMV-gerechte Vorkehrungen zu treffen.

Literatur

- [1] R. Putz: Über Streckenwiderstände und Gleisströme bei Einphasenstrombahnen. El. Bahnen, Heft 5/6, 1944.
- [2] W. Bethge und R. Kraft: Qualitative Beeinflussungsbetrachtungen für das Umfeld el. Bahnstrecken. El. Bahnen, Heft 10, 1990, S. 368–369.
- [3] W. Bethge: Die EMV el. Triebfahrzeuge mit Nachrichtenanlagen. El. Bahnen Heft 11, 1986.
- [4] Verordnung über die Anlagen Elektrischer Bahnen. VEAB, Entwurf in Vernehmlassung.

Anmerkung: Die wesentlichen Aussagen dieses Aufsatzes wurden vom Autor bereits an der ETG-Tagung vom 22. November 1991 zum Thema «EMV, eine Herausforderung für den Energie- und Elektronik-Ingenieur» in Lausanne vorgetragen.