Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke

Band: 62 (1971)

Heft: 1

Artikel: Rückwirkungen von thyristorgespeisten Triebfahrzeugen : Erfahrungen aus Messungen in der Schweiz

Autor: Baechler, U.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-915792

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

Rückwirkungen von thyristorgespeisten Triebfahrzeugen

Erfahrungen aus Messungen in der Schweiz

Beitrag zu der Diskussionstagung des SEV vom 3./4. November 1970 in Zürich,

von *U. Baechler,* Effretikon

621.314.632.049:621.335

1. Wechselstromfahrzeuge

1.1 Allgemeines

Bei den ersten auf Schweizer Bahnen in Betrieb gesetzten Stromrichterfahrzeugen mit Anschnittsteuerung handelte es sich durchwegs um Fahrzeuge für den Rangierdienst. Dank der geringen Leistungen ($\leq$ 500 kW) hatten die systembedingten Oberwellenanteile des Traktionsstromes keine störenden Beeinflussungen zur Folge. Dieser Sachverhalt änderte sich schlagartig mit der Inbetriebnahme der leistungsstarken Thyristorlokomotive Re 4/4, Nr. 161, der Bern-Lötschberg–Simplon-Bahn (BLS). Den die Erwartungen weit übertreffenden traktionstechnischen Eigenschaften dieser Lokomotive standen starke Beeinflussungen der Fernmelde- und insbesondere Sicherungsanlagen gegenüber, die einen regulären Einsatz verunmöglichten.

Die nachstehend beschriebenen Messfahrten mit dieser Lokomotive erfolgten auf dem Netz der BLS, auf einem mit Normalspurgleis versehenen Abschnitt der Rhätischen Bahn sowie auf dem Gebiet des Bahnhofs Bern der Schweizerischen Bundesbahnen. Sie hatten folgende Zwecke:

a) Untersuchungen über die Zusammenhänge Art/Ausmass der störenden Beeinflussung und Betriebszustand der Stromrichter;
b) Abklärung der Beeinflussung einzelner Signalanlagentypen (Gleisfreimelde-Stromkreise);
c) Untersuchungen über die Einsatzmöglichkeiten von Thyristorfahrzeugen auf isolierten Bahnnetzen;
d) Radiostörmessungen;
e) erste qualitative Messungen über die Beeinflussung der Signale Linienleiter/Triebfahrzeug.

1.2 Kurzbeschreibung der Lokomotive

Verschiedene Messungen waren nur dank Besonderheiten in der Stromrichtersteuerung dieser Lokomotive möglich, so dass sich eine kurze Beschreibung unter besonderer Berücksichtigung dieser Eigenheiten aufdrängt.

Die Thyristorlokomotive Re 4/4, Nr. 161, der BLS entstand durch Umbau einer Diodengleichrichterlokomotive. Der Komplex Stufentransformator/Stufenschalter/Diodenbrücke wurde durch einen Transformator mit vier Sekundärwicklungen mit festen Übersetzungsverhältnis sowie vier unsymmetrisch halbgesteuerten Stromrichterbrücken ersetzt. Eine Änderung der übrigen Teile der elektrischen Ausrüstung erfolgte nur soweit, als es zur Anpassung an die Thyristorsteuerung erforderlich war (Fig. 1).

Die vier Stromrichterbrücken sind aufgeteilt in zwei Blöcke zu je zwei Brücken in Serie. Jeder Block speist die zwei Triebmotoren eines Drehgestells über eine gemeinsame Glättungsdrosselspule. Um bei schweren Anfahrten die unterschiedlichen Adhäsionsgewichte des vor- und nachlaufenden Drehgestells berücksichtigen zu können, ist eine ungleiche Aussteuerung der beiden Stromrichterblöcke möglich.

Die Zündung der Thyristoren ist mit einer besonderen Zündlogik [1][1]) überwacht. Diese gestattet es, bei Vollaussteuerung die Thyristoren ungeachtet des Lückbetriebes im frühest möglichen Zeitpunkt zu zünden. Im Gegensatz zur oft verwendeten Gleichrichterbegrenzung ist damit ein dem ungesteuerten Stromrichter entsprechender Betrieb möglich. Für Messungen und Versuche kann jedoch eine beliebige Gleichrichterbegrenzung eingestellt werden.

Die Hauptdaten der Lokomotive sind:

Spurweite	1435 mm
Achsanordnung	Bo Bo
Dienstgewicht	80 t
Gewicht des elektrischen Teiles	40,3 t
Stundenleistung an den Motorwellen (max Erregerfeld)	4980 kW
entsprechende Geschwindigkeit	77,6 km/h
Dauerleistung an den Motorwellen (max. Erregerfeld)	4740 kW
entsprechende Geschwindigkeit	79,3 km/h
max. Geschwindigkeit	140 km/h

1.3 Meßstellen und Messverfahren

Auf der Lokomotive wurden die elektrischen Grössen der Primärseite des Haupttransformators auf Magnetband registriert. Dieses Verfahren hat sich dank der Reproduzierbarkeit der Werte ausserordentlich bewährt. So gestatteten diese Aufnahmen die nachträgliche harmonische Analyse und die psophometrische Bewertung des Primärstromes. Ebenso konnte nachträglich der Betriebszustand des Stromrichters bzw. der Lokomotive zu jedem beliebigen Zeitpunkt bestimmt

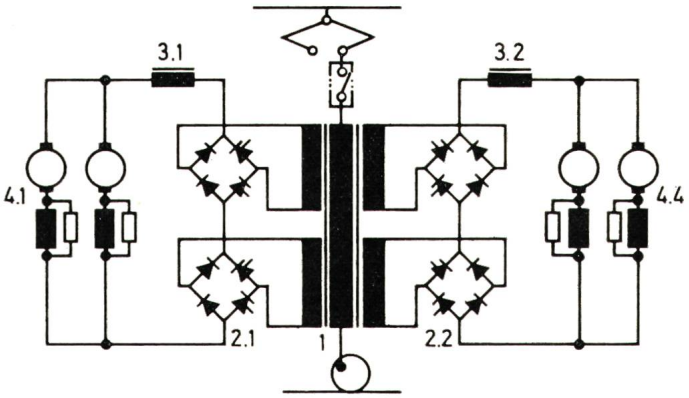


Fig. 1
Prinzipschema der Hauptstromkreise für Fahrbetrieb
1 Transformator; *2* Stromrichter; *3* Glättungsinduktivitäten; *4* Triebmotoren

[1]) Siehe Literatur am Schluss des Aufsatzes.

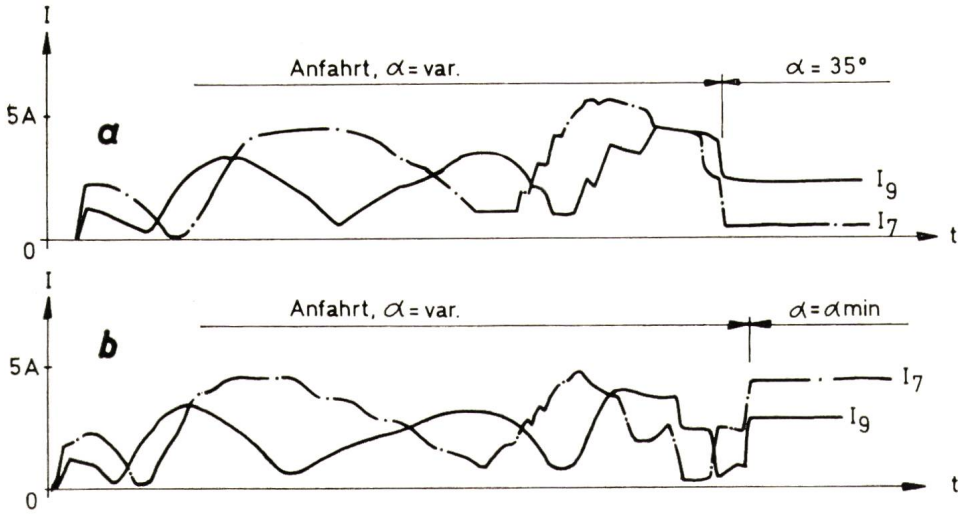


Fig. 2
Verlauf der 7. und 8. Oberwelle während einer Anfahrt mit konstantem Gleichstrom
a mit Gleichrichterbegrenzung 35°; *b* mit max. Aussteuerung gemäss Zündlogik

werden, was die Feststellung von Zusammenhängen zwischen Störung an ortsfesten Anlagen und Vorgängen auf dem Fahrzeug ermöglichte.

Die Bestimmung der einzelnen Oberwellen ist bei einer Grundwelle von 16⅔ Hz ausserordentlich heikel, da der Frequenzanalysator sehr schmalbandig und frequenzkonstant sein muss. Die Aufnahme des Amplitudenverlaufs einer Oberwelle während der Messfahrt hätte kaum befriedigende Resultate ergeben.

An den Fernmeldekabeln wurden die Längs- und Querspannungen teils mit Schreibern, teils auf Magnetband registriert. Die psophometrische Bewertung der Querspannungen erfolgte direkt auf dem Messplatz.

An den Gleisfreimelde-Stromkreisen wurden die Gleis- und Relaisspannungen registriert. Je nach Anlagetyp existierte zur Zeit der Messungen jedoch kein befriedigendes Verfahren, dass Aussagen über die Stärke der Beeinflussung und den Sicherheitsabstand gestattet. Leider ist man hier vielfach noch auf visuelle Beobachtungen angewiesen.

Im Unterwerk wurden bei Inselbetrieb ebenfalls die elektrischen Grössen auf Speisenetz- und Fahrleitungsseite registriert.

Für die Synchronisation der Messungen an den ortsfesten Anlagen und auf der Lokomotive erwies sich ein Funknetz z. T. ergänzt durch Gegensprechanlagen als beinahe unerlässliches Hilfsmittel.

1.4 Niederfrequente Oberwellen

Da ein grosser Teil der Stellwerkanlagen bei Schweizer Bahnen zur Gleisfreimeldung Systeme mit Strömen einer Frequenz von 100 bzw. 125 Hz verwendet, stellen die niederfrequenten Oberwellen der Thyristorfahrzeuge ein zentrales Problem dar.

Eine erste Untersuchung über den Amplitudengang niederfrequenter Oberwellen in Funktion des Steuerwinkels des Stromrichters bei konstantem Gleichstrom ergab eine Bestätigung der in [2] theoretisch hergeleiteten Kurven. Je nach dem Verhältnis Kommutierungsreaktanz/Glättungsreaktanz ergeben sich bei bestimmten Steuerwinkeln ausgeprägte Maxima und Minima einer Oberwelle. Eine Anwendung dieser Erkenntnis ergibt sich bei mehreren in Reihe geschalteten Stromrichterbrücken in Systemfolge: Wählt man bei den erstgesteuerten Brücken die Gleichrichterbegrenzung so, dass die Amplitude einer unerwünschten Harmonischen ein Minimum aufweist, so beträgt die maximal auftretende Amplitude in der Reihenschaltung nur unwesentlich mehr als diejenige einer Brücke (Fig. 2). Die Anwendung einer Gleichrichterbegrenzung hat allerdings eine verminderte Ausnützung der angebotenen Spannung bei gleichzeitiger Erhöhung der Grundwellenblindleistung zur Folge.

Dieses Verfahren mag ein bescheidener Hinweis darauf sein, dass bei mehreren in Reihe geschalteten Stromrichterbrücken auch andere Aussteuerverfahren als die reine Systemfolge möglich sind. Verzichtet man auf das Prinzip der Minimalisierung der Grundwellenblindleistung, so ist eine Optimalisierung nach anderen Parametern, z. B. nach einer minimalen Oberwellenblindleistung in einem bestimmten Frequenzbereich, denkbar.

Im untersuchten Bereich bis 150 Hz waren im ungestörten Betrieb gerade Harmonische nur beim Übergang der Aussteuerung von der ersten auf die zweite Brücke feststellbar. Die 6. und 8. Oberwelle überschritten dabei jedoch 0,6 % der Grundwelle nicht. Dieses gute Resultat ist zweifellos auf die Genauigkeit der Symmetrie der Steuersätze zurückzuführen, die einzig bei sehr grossen und sehr kleinen Zündwinkeln systembedingt etwas reduziert wird. Unterbleiben jedoch infolge einer Störung die Zündimpulse eines Brückenzweiges, so erreichen die geraden Harmonischen Werte, die z. B. bei 100 Hz wesentlich über denjenigen der benachbarten ungeraden Harmonischen liegen.

1.5 Störströme der Lokomotive

Die psophometrische Bewertung des Primärstromes (nach VDE 0227) ergab für die Fälle «Betrieb mit Gleichrichterbegrenzung» und «Betrieb mit maximaler Aussteuerung gemäss Zündlogik» interessante Resultate: Beim Betrieb mit Gleichrichterbegrenzung ist der Störstrom bei gleicher Grundwellenamplitude ungefähr doppelt so gross wie beim Betrieb mit maximaler Aussteuerung gemäss Zündlogik (Fig. 3).

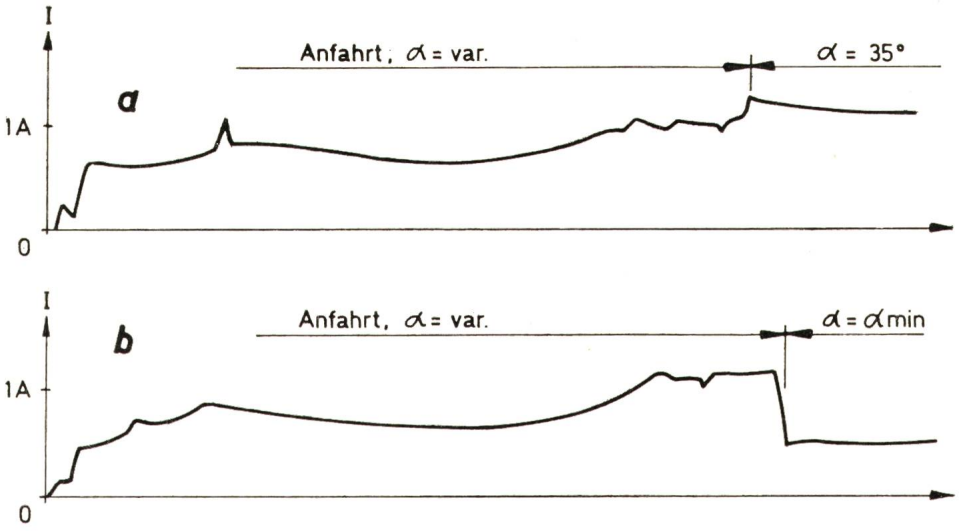
Damit ist die Unzulässigkeit gewisser Vergleichswerte zwischen Thyristor- und Diodenlokomotiven nachgewiesen, die dadurch gefunden wurden, dass man die Diodenlokomotive durch ein mit festem Zündwinkel und Stufenschaltersteuerung betriebenes Thyristorfahrzeug nachbildete.

1.6 Beeinflussung von Gleisfreimelde-Stromkreisen

Dieses Thema soll hier nur sehr summarisch dargestellt werden. Es sei erwähnt, dass die untersuchten Systeme durchwegs einschienig isoliert, d. h. erdungssymmetrisch waren.

Gleichstrom-Gleisstromkreise wurden auch bei Abschnitten bis zu 1500 m Länge nicht gestört. Bei Wechselstromsystemen niedriger Frequenz war die Störung abhängig von der gewählten Frequenz und der Frequenzselektivität des

Fig. 3
Verlauf des Störstromes während einer Anfahrt mit konstantem Gleichstrom
a mit Gleichrichterbegrenzung 35°; *b* mit max. Aussteuerung gemäss Zündlogik



Empfängers. So traten beim 100-Hz-System, das über ein sehr selektives Relais verfügt und dessen Frequenz in der Mitte der Lücke zwischen zwei ungeraden Harmonischen liegt, nur in zwei Fällen Störungen auf; an einem Abschnitt, dessen Relais mit Zenerdioden beschaltet war, was eine reduzierte Frequenzselektivität zur Folge hat (die Störung war nicht reproduzierbar!) und beim Betrieb der Lokomotive mit einem für Messzwecke ausgeschalteten Brückenzweig, wobei dieser «Defektfall» der Lokomotive wie im Abschnitt 1.4 erwähnt eine starke 100-Hz-Komponente zur Folge hat.

Für einen störungsfreien Betrieb von Thyristorfahrzeugen auf Strecken mit niederfrequenten Gleisfreimelde-Stromkreisen lassen sich aus den Messungen einige Bedingungen ableiten:

Gleisstromkreise:	Wahl der Frequenz in der Lücke zwischen zwei ungeraden Harmonischen der Traktionsfrequenz. Genügende Frequenzselektivität, evtl. verbunden mit beschränkter Länge der Abschnitte oder zweischieniger Isolierung.
Speisung:	Starre Kupplung von Fahrleitungsspeisung und Speisung der Sicherungsanlagen. Es muss vermieden werden, dass Frequenzschwankungen des Fahrleitungsnetzes gegenüber dem Speisenetz der Sicherungsanlagen den zulässigen Frequenzbereich für Gleichstromkreise einengen oder gar überschneiden.
Stromrichter-Fahrzeug:	Vermeidung des störenden Auftretens niederfrequenter geradzahliger Oberwellen durch: a) präzise Steuersätze; b) langsame Regelungen; c) Überwachung der Stromrichterfunktionen.

Es ist in diesem Zusammenhang interessant, dass der Einschaltstromstoss hochausgenützter Lokomotivtransformatoren, der beträchtliche geradzahlige Oberwellenanteile enthält, bisher scheinbar zu keinen Störungen geführt hat.

1.7 Beeinflussung der Fernmeldekabel

Nach den ersten Einsätzen der Thyristorlokomotive auf der BLS traten unter dem Eindruck sehr starker Beeinflussungen der Fernmeldesysteme die Störungen an den Signalanlagen etwas in den Hintergrund. Es zeigte sich jedoch bald, dass sich die Fernmeldestörungen durch Massnahmen auf der Kabelseite praktisch beheben liessen.

Aufgrund dieser Tatsache blieb es bei einmaligen Versuchen mit *RC*- und *RLC*-Filtern auf der Lokomotive. Diese Filter hatten wohl eine Reduktion der Oberwellen im Sprachbereich zur Folge, verstärkten jedoch die niederfrequenten Harmonischen im Frequenzbereich der Sicherungsanlagen. Ausserdem sind auf dieser Lokomotive Gewicht und Volumen für zusätzliche Einrichtungen aufs äusserste beschränkt.

Die Massnahmen an den Kabelanlagen der BLS gingen nach zwei Seiten: Verbesserung der Übertragungseigenschaften durch Bespulung (Pupinisierung) der Kabel und Erhöhung der Erdsymmetrie durch Auskreuzen der Kabeladern. Die erreichten Resultate gestatten von der Fernmeldeseite her den Einsatz von mehreren Hochleistungsthyristorfahrzeugen auf der BLS.

Eine Untersuchung an einem ca. 5 km langen Kabelabschnitt der Rhätischen Bahn über Verbesserungsmöglichkeiten der Erdsymmetrie ergab folgende Empfindlichkeitsfaktoren (Quotient aus bewerteter Querspannung durch bewertete Längsspannung, $k_u = U_{QP}/U_{LP}$).

Unabgeglichenes Aderpaar	$k_u = 2{,}6 \cdot 10^{-4}$
Aderpaar mit Kreuzungsausgleich	$k_u = 0{,}9 \cdot 10^{-4}$
Aderpaare mit Abgleich durch Kondensatoren an diskreten Punkten	$k_u = 2{,}0 \cdot 10^{-4}$
	$k_u = 1{,}5 \cdot 10^{-4}$

Diese Resultate dürfen nicht ohne weiteres verallgemeinert werden, da nur an diesen vier Aderpaaren gemessen werden konnte. Es scheint insbesondere ein gutes unabgeglichenes Aderpaar getroffen worden zu sein.

1.8 Beeinflussung der Informationsübertragung Linienleiter/Triebfahrzeug

Diese Messungen wurden zur Gewinnung eines ersten Eindruckes über die Beeinflussung der Informationsübertragung Linienleiter/Triebfahrzeug durch Thyristorlokomotiven durchgeführt. Sie erfolgten parallel zu den übrigen Versuchsfahrten.

Der Messzug bestand aus der BLS-Thyristorlokomotive, dem Messwagen für Informationsübertragung und einer SBB-Lokomotive Typ Re 4/4 II mit Hochspannungssteuerung und Direktmotoren. Beide Lokomotiven sowie der Messwagen waren mit je zwei Antennen ausgerüstet. Die Messungen wurden mit beiden Lokomotiven durchgeführt, so dass ein echter Vergleich möglich war. Übertragen wurde ein Frequenz-Shift-Kanal mit synchroner Tastung.

Zur Vermeidung der Verlegung eines Linienleiterkabels wurden die Empfangsantennen beider Lokomotiven über je ein lose mit ihnen gekoppeltes Kabel aus dem Messwagen mit einem Nutzsignal in Form eines Prüftelegrammes versorgt. Die Auswertung der Empfangssignale erfolgte wiederum im Messwagen. Bei diesem Messverfahren werden die Störungen, die auf Steuerungs- und Schaltvorgängen im

Triebfahrzeuge beruhen sowie solche, die auf Schwankungen im Kontakt zwischen den Schienen und den einzelnen Rädern und damit auf einen sich ständig verändernden Anteil der einzelnen Räder an der Führung des gesamten Traktionsrückstromes zurückzuführen sind, erfasst. Dagegen bleiben die Störeinflüsse, die vom Linienleiter und seiner Verlegungsart abhängig sind, unberücksichtigt. Im Vergleich zu den erstgenannten Einflüssen sind aber, wie die bisherigen Erfahrungen gezeigt haben, die letzteren für die Übertragungsrichtung «ortsfeste Station/Triebfahrzeug», die durch diese Messungen nachgebildet wurde, zu vernachlässigen.

Es wurden immer die Antennen derjenigen Lokomotive für die Messung verwendet, die bei der betreffenden Messfahrt als Zuglokomotive diente.

Parallel, aber unabhängig voneinander, wurden zwei Messungen durchgeführt. Über die Antennen des Messwagens wurde der vorhandene absolute Störpegel im Frequenzbereich 40 $\pm$ 1 kHz aufgezeichnet, währenddem durch Vergleich empfangenes Telegramm/Prüftelegramm die Bitfehlerrate in Funktion der Sendeleistung bestimmt wurde.

Die Störpegel-Messung zeigte für Fahrten mit der Thyristorlokomotive eine generelle Erhöhung von 7...8 dB gegenüber der Direktmotorlokomotive. Diese Differenz gilt sowohl für die der Lokomotive zugewandte als auch die abgewandte Antenne des Messwagens.

Die Messung der Bitfehlerrate in Funktion der Sendeleistung ergab folgende Resultate:

In einem Sendeleistungsbereich, der bei der Direktmotorlokomotive fehlerfreie Übermittlung gestattete, wurde bei der Thyristorlokomotive bereits eine Fehlerrate der Grössenordnung $3{,}6 \cdot 10^{-3}$ ermittelt. Charakteristisch für diese Fehler war ihre sehr kurze Dauer; sie umfassten in der Regel nur ein Bit. Ausserdem wiederholten sie sich mit einer Frequenz von 33 Hz. Dies weist zusammen mit anderen Merkmalen darauf hin, dass die steilen Kommutierungsflanken der Ströme den Schwingkreis der Empfangsantenne anstiessen. Wie weit diese Störungen systembedingt oder eine Folge einer bestimmten Stromrichterbeschaltung, Verkabelung, unvollkommener Abschirmung und dergleichen sind, konnte im Rahmen dieser Fahrten nicht abgeklärt werden.

2. Gleichstromfahrzeuge

Die ersten in der Schweiz verkehrenden, aus einer Fahrleitung gespeisten Chopperfahrzeuge sind auf dem Trolleybusnetz der Verkehrsbetriebe St. Gallen eingesetzt. Es handelt sich um einen Prototyp sowie eine in Auslieferung begriffene Serie von sieben Fahrzeugen.

Die möglichen Arten von Rückwirkungen durch ein Trolleybusnetz sind dank der bis in die Speisestation einwandfrei isolierten Rückleitung geringer als durch Bahnanlagen. So fallen unter anderem galvanische Ankopplungen wie Gleisstromkreise weg, auch ist die Beeinflussung von Kabeln durch die enge Leiterschleife, die die nahe beieinanderliegenden Hin- und Rückleiter bilden, stark reduziert. So traten in der Folge denn auch nur Radiostörungen und Beeinflussungen eines hochfrequenzgesteuerten Fahrleitungs-Weichenstellsystems auf.

Die Radiostörungen konnten durch entsprechende Disposition der elektrischen Ausrüstung im Fahrzeug, durch geschickte Kabelführung, durch Abschirmung des Stellers sowie durch Beschaltungen an den von den Störquellen abgehenden Leitungen behoben werden. Die Beschaltungsmassnahmen sind bei einem Trolleybus allerdings heikel, da der einwandfreien Isolation des Wagenkastens gegenüber Hin- und Rückleitung besondere Aufmerksamkeit geschenkt werden muss. Die gemessenen Feldstärken blieben auch bei maximaler Traktionsleistung unterhalb der Hälfte der zulässigen Werte.

Die Fahrleitungs-Weichenstellvorrichtung besteht aus einem unten am Fahrzeug angebrachten Hochfrequenzsender und einer im Strassenbelag eingelassenen Antenne. Die Störung erfolgte hier wiederum dadurch, dass die Kommutierungsvorgänge des Stellers den Schwingkreis der Empfangsantenne anstiessen.

Als Ergänzung sei zum Schluss noch auf eine Messung über die Beeinflussung der Signale Linienleiter/Triebfahrzeug (analog Abschn. 1.8) an einem 500-kW-Fahrzeug für 1500 V— in Frankreich hingewiesen. Weder Störpegel noch Bitfehlerrate unterschieden sich gegenüber einem konventionellen Gleichstromfahrzeug.

Literatur

[1] *K. Winkler:* Ausserordentliche Betriebszustände in gesteuerten Einphasen-Gleichrichterschaltungen und Massnahmen zu deren Vermeidung. Brown Boveri Mitt. 56(1969)11/12, S. 589...596.

[2] *G. Möltgen:* Eigenschaften des Stromrichters in zweipulsiger halbgesteuerter Brückenschaltung. Elektr. Bahnen 39(1968)11, S. 256...264.

Adresse des Autors:

U. Baechler, Gruppenchef in der Abteilung Bahntechnik, AG Brown, Boveri & Cie., 5401 Baden.