

# Stand der Untersuchungen über die Störbeeinflussungen von Stromrichter-Triebfahrzeugen bei den SBB

Autor(en): **Huber, J. / Winter, P.**

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): **67 (1976)**

Heft 14

PDF erstellt am: **08.08.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-915188>

## **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.

# Stand der Untersuchungen über die Störbeeinflussungen von Stromrichter-Triebfahrzeugen bei den SBB

Von J. Huber und P. Winter

621.335:621.3.018.33

*Die Störwirkungen von Stromrichter-Triebfahrzeugen werden bei den SBB durch eine Arbeitsgruppe mit Vertretern aus allen beteiligten Abteilungen intensiv untersucht. Eine technische Analyse des komplexen Problemkreises zeigt, dass zwischen Rückwirkungen der Triebfahrzeuge auf das speisende Netz und Einwirkungen über Kopplungsmedien auf die eigentlichen gestörten Objekte zu unterscheiden ist.*

*Massgebend für die Netzurückwirkungen sind einerseits die Triebfahrzeug-Stromrichter und andererseits verschiedene Parameter am Netz, wie Netzkonfiguration, Speiseleistung usw. Für Triebfahrzeug-Stromrichter eignen sich heute Anschnittsteuerungen insbesondere in Mehrfach-Folgeschaltung. Die Entwicklung von noch netzfreundlicheren pulsgesteuerten Netzstromrichtern wird von den SBB voll unterstützt. Das System Energieversorgung-Fahrleitung stellt infolge des Zusammenwirkens verschiedener Induktivitäten und Kapazitäten ein schwingungsfähiges Gebilde dar.*

*Die Störbeeinflussungen werden am Beispiel von Schienenstromkreisen erläutert. Die Untersuchungen zeigen, dass die Störspannungen am Gleis durch verbesserte Erdungen mit Erdseilen und durch zwischenliegende Schienenisolationen wirksam verkleinert werden können.*

*Les perturbations provoquées par des locomotives et automotrices à redresseurs sont étudiées très activement par un groupe de travail comprenant des représentants de toutes les divisions concernées. Une analyse technique de ce problème complexe montre qu'il faut distinguer entre les réactions des engins moteurs sur le réseau d'alimentation et les effets sur les objets perturbés par couplages divers.*

*Les répercussions sur le réseau dépendent, d'une part, des redresseurs des engins moteurs et, d'autre part, de différents paramètres du réseau tels que configuration, puissance d'alimentation, etc. Les redresseurs des engins moteurs sont commandés maintenant par réglage de phase, de préférence en montage séquentiel multiple. Les CFF approuvent pleinement le développement de redresseurs à commande par impulsions, encore moins gênants pour le réseau. Le système alimentation en énergie/ligne caténaire constitue une configuration capable d'osciller, du fait de couplages entre inductivités et capacités diverses.*

*Les perturbations sont expliquées à l'exemple de circuits de voie. Les investigations montrent que les tensions perturbatrices à la voie peuvent être efficacement réduites en améliorant les mises à la terre par des câbles de terre et par l'isolement des deux rails.*

## 1. Einleitung

Bekanntlich findet die moderne Leistungselektronik auf Eisenbahn-Triebfahrzeugen in zunehmendem Mass Verwendung. Über die Vorteile dieser Technik für die Traktion wurde schon in vielen Veröffentlichungen berichtet [1; 2]<sup>1)</sup>. Es sei an dieser Stelle nur kurz auf die Verbesserungen hingewiesen, welche sich dank der Thyristorsteuerung bei den neuen Vororttriebzügen der Schweizerischen Bundesbahnen SBB erzielen liessen. Tabelle I zeigt den Vergleich zu den konventionell gebauten Zügen aus den Jahren 1965...67. Die Thyristortechnik hat entscheidend dazu beigetragen, dass beim neuen Zug der Allachsantrieb verlassen werden konnte. Dank der stufenlosen und verschleissfreien Leistungsregulierung bieten die neuen Triebwagen trotz der höheren installierten Leistung einen besseren Fahrkomfort bei niedrigeren Unterhaltskosten.

Bei den SBB wurden die ersten Stromrichter vor mehr als 15 Jahren in Mehrsystem-Rangierlokomotiven und -Triebwagen eingebaut. Die relativ niedrigen Leistungen führten zu keinen schwerwiegenden Beeinflussungsproblemen. Hingegen hat das Problem der «Verträglichkeit elektromagnetischer Systeme» mit dem Aufkommen von leistungsfähigen Stromrichtern für Streckenfahrzeuge eine zeitgemässe Erweiterung erfahren. Bei den SBB liegen diesbezüglich leider besonders heikle Bedingungen vor. Die teilweise noch aus der Frühzeit der Elektrifikation stammenden Energieversorgungsanlagen und Fahrleitungen sind heute bereits durch den stark angewachsenen Park an neueren leistungsfähigen Lokomotiven und Triebwagen bis zum äussersten beansprucht. Die bahneigenen Fernmeldekabel sind auf vielen Strecken ebenfalls relativ alt und störfähig. In neueren Sicherungsanlagen ist ein sehr störfähiger 125-Hz-Schienenkreistyp weit verbreitet, welcher kurz vor dem Aufkommen der Thyristor-Stromrichter entwickelt wurde.

Die mit der Thyristor-Traktion zusammenhängenden Probleme lassen sich durch eine Fachabteilung der SBB allein

nicht lösen. Aus dieser Erkenntnis heraus wurde vor einiger Zeit eine Arbeitsgruppe mit Vertretern aller beteiligten Stellen gebildet, welche folgende Ziele verfolgt:

- Anordnung von Massnahmen, welche erforderlich sind, um gewisse betrieblich wichtige Strecken möglichst bald für den Einsatz von bestehenden Stromrichter-Fahrzeugen der SBB und von anderen Bahnverwaltungen freizugeben
- Studium der Massnahmen, welche erforderlich sind, um bestimmte Regionen kurzfristig für den Einsatz einer grösseren Zahl von thyristorgesteuerten Vororttriebzügen vorzubereiten
- Ausarbeitung von Richtlinien, welche inskünftig - im Hinblick auf eine integrale Einführung der Stromrichter-Traktion - beim Neubau von Triebfahrzeugen einerseits und bei der Erneuerung von ortsfesten Anlagen andererseits zu berücksichtigen sind

Die folgenden Ausführungen behandeln einige Ergebnisse der bisher durchgeführten, vorwiegend experimentellen, Untersuchungen.

## 2. Problemstellung

Einen Überblick über die komplexen Zusammenhänge zwischen der elektrischen Anspeisung von Stromrichter-Triebfahrzeugen und den Störbeeinflussungen an ortsfesten elektrischen Anlagen gibt Fig. 1. Zwischen den Teilsystemen Energieversorgung - Fahrleitung - Triebfahrzeug besteht eine enge Wechselwirkung. Während die Netzspannung im wesentlichen von der Energieversorgung vorgegeben wird, prägt das Triebfahrzeug den Netzstrom. Dieser weist bei Stromrichterfahrzeugen infolge der nichtlinearen Schaltelemente einen von der Sinusform mehr oder weniger abweichenden Verlauf auf [3]. Durch die verschiedenen Impedanzen im gesamten Netzstromkreis übertragen sich diese Verzerrungen auf die Netzspannung. Dabei ist zu beachten, dass das System Energieversorgungsanlagen - Fahrleitung ein schwingungsfähiges Gebilde darstellt. Die Spannungen und Ströme im Netz enthalten somit neben den grundfrequenten Anteilen noch höherfrequente Oberschwingungen, welche als Störspannung bzw. Störstrom bezeichnet werden. Diese verursachen einerseits zusätzliche Erwärmungen in den Energieversorgungsanlagen und ander-

<sup>1)</sup> Siehe Literatur am Schluss des Aufsatzes.

Vergleichswerte	Schwerer Triebzug, dreiteilig, alle Achsen angetrieben (RABDe 12/12)	Neuer leichter Triebzug, dreiteilig, 8 von 12 Achsen angetrieben (RABDe 8/12)	Neuer leichter Triebzug, vierteilig, 8 von 16 Achsen angetrieben (RABDe 8/16)
Länge	73,3 m	75,0 m	100,0 m
Eigenmasse	170 t	124 t	149 t
Masse bei besetztem Zug	194 t	148 t	181 t
Zahl Sitzplätze	200	198	278
Eigenmasse pro Sitzplatz	0,85 t	0,63 t	0,54 t
Stundenleistung an den Fahrmotorwellen	2520 kW bei 80 km/h	2304 kW bei 81 km/h	2304 kW bei 81 km/h
Mittlere Beschleunigung (0–85 km/h für besetzten Zug)	0,90 m/s <sup>2</sup>	0,85 m/s <sup>2</sup>	0,75 m/s <sup>2</sup>
Mittlere Verzögerung	0,75 m/s <sup>2</sup>	0,75 m/s <sup>2</sup>	0,75 m/s <sup>2</sup>

seits die im folgenden beschriebenen Störbeeinflussungen auf gewisse ortsfeste elektrische Anlagen.

Mit den dünn gezeichneten Pfeilen ist in Fig. 1 dargestellt, dass die Beeinflussung der gestörten Objekte über bestimmte Kopplungsmedien erfolgt. Dabei kann es sich um galvanische Verbindungen, Gegeninduktivitäten, Kapazitäten oder um Kombinationen derselben handeln. In den meisten Fällen treten die Kopplungen auf der Strecke auf, weil hier über längere Distanzen Fernmeldekabel und Schienenstromkreise eng neben der Fahrleitung und dem Gleis angeordnet sind. Eine andere Form der Beeinflussung ergibt sich bei jenen Objekten, welche über Netzanschlussgeräte mit der verzerrten Netzspannung gespeist werden. Zu den beeinflussten Objekten zählen insbesondere Sicherungs-, Fernmelde- und Netzschutzeinrichtungen. In diesen Geräten entstehen nach Massgabe ihres Frequenzganges (Selektivitätskurve) unerwünschte Störsignale, welche das sichere Funktionieren in Frage stellen können.

Zur Verbesserung der Verträglichkeit der verschiedenen Systeme bieten sich grundsätzlich folgende Möglichkeiten an:

- a) Minimalisierung der Rückwirkungen auf das speisende Netz. Mittel: Schaltungs- und steuerungstechnische Massnahmen am Triebfahrzeug-Stromrichter; Verstärkung und Vermaschung der Energieversorgungsanlagen und der Fahrleitung.
- b) Minimalisierung der Kopplung zwischen dem Netz und den beeinflussten Objekten. Mittel: Verbesserung der Stromrückleitung (Erdseile, Erdung von Kabelmänteln); Symmetrierung (Schienenstromkreise, Kabeladern).
- c) Verbesserung der Selektivitätskurve der beeinflussten Objekte.

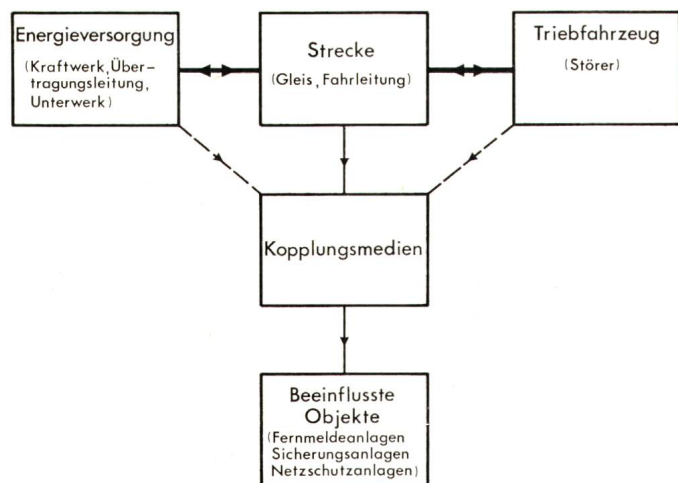


Fig. 1 Blockscheema der Netzurückwirkungen und der Störbeeinflussungen

Für eine gesamthaft optimale Lösung der Beeinflussungsprobleme sind alle diese Aspekte zu berücksichtigen und gegeneinander abzuwägen. Unerlässliche Voraussetzung ist eine genaue Kenntnis der Netzurückwirkungen und der verschiedenen Kopplungsparameter. In der Praxis erweist sich insbesondere die theoretische Behandlung des Problems als ausserordentlich schwierig, weil einerseits die Anzahl, die örtliche Verteilung und der Betriebszustand der Triebfahrzeuge ständig ändert, und weil andererseits auch die Kopplungsparameter vielen Einflüssen, wie Schaltzustand des Netzes, Bodenbeschaffenheit, Witterung usw. unterworfen sind.

### 3. Entwicklung im Stromrichter-Triebfahrzeugbau

Bis heute sind für Wechselstrom-Triebfahrzeuge, die bekanntlich eine einphasige Anspeisung erfordern, im wesentlichen folgende Stromrichterbauarten entwickelt worden:

#### 3.1 Ungesteuerte Gleichrichter

Diese älteste Stromrichterbauform beruht auf Transformator-Mittelpunkt- oder Brückenschaltungen. Sie wurde bei den SBB nur auf Mehrsystem-Rangierlokomotiven mit relativ kleiner Leistung sowie auf den TEE-Mehrsystem-Triebzügen eingesetzt. Auf dem Netz der SBB verkehren jedoch auch Gleichrichterlokomotiven und -Triebwagen von schweizerischen Privatbahnen und von ausländischen Bahnverwaltungen. Diese Fahrzeuge ergeben im Netz bedeutend stärkere Oberschwingungen und einen etwas niedrigeren Leistungsfaktor als konventionell gebaute Triebfahrzeuge.

#### 3.2 Anschnittgesteuerte Gleich- und Wechselrichter

Die ersten steuerbaren Gleichrichter wurden bei den SBB mit gittergesteuerten Quecksilberdampfgefässen in Mittelpunktschaltung auf den Rangierlokomotiven Ee3/3<sup>IV</sup> und mit einer Thyristor-Brückenschaltung auf der Rangierlokomotive Ee3/3<sup>II</sup> Nr. 16502 realisiert. Im Jahr 1968 rüstete Brown Boveri die Hochleistungslokomotive Re4/4 Nr. 161 der Berner Alpenbahn-Gesellschaft BLS mit einem Thyristor-Stromrichter in zweistufiger Folgeschaltung aus. Auf Grund der Betriebserfahrungen mit dieser Lokomotive setzte sich die Erkenntnis durch, dass für leistungsfähige Streckenfahrzeuge schaltungstechnische Massnahmen zur Verbesserung des Netzverhaltens unumgänglich sind. Als optimale Lösung erwiesen sich für schweizerische Verhältnisse Mehrfach-Folgeschaltungen. Deshalb wurde 1971/72 die BLS-Lokomotive unter massgeblicher finanzieller Beteiligung der SBB umgebaut und mit einem neu entwickelten achtstufigen Stromrichter in Sparschaltung aus-

gerüstet, der für Versuchszwecke auch vier- und zweistufig betrieben werden konnte [4]. Umfangreiche Messungen an diesem Versuchsfahrzeug zeigten – in Übereinstimmung mit theoretischen Berechnungen – dass mit Folgeschaltungen von mindestens vier Teilstromrichtern weitgehend dasselbe Netzverhalten erzielt werden kann wie mit ungesteuerten Gleichrichtern [5; 6]. Mit derartigen Schaltungen wurden in den letzten Jahren u. a. die neuen Vororttriebzüge der SBB und die neuen Streckenlokomotiven vom Typ Ge4/4<sup>II</sup> der Rhätischen Bahnen RhB ausgerüstet.

### 3.3 Pulsgesteuerte Gleich- und Wechselrichter

Schnellschaltende pulsgesteuerte Wechselrichter werden in erster Linie für die Speisung von Asynchron-Fahrmotoren auf einer konstanten Gleichspannung verwendet. Die hierfür erforderlichen «schnellen» Thyristoren mit Freiwerdezeiten von weniger als 50 µs lassen sich zurzeit erst für bedeutend niedrigere Leistungen realisieren als die Thyristoren von anschnittgesteuerten Stromrichtern.

Im Jahr 1972 wurde bei den SBB – weltweit eines der ersten Fahrzeuge – ein älterer Gepäcktriebwagen mit stromrichter- gespeisten Asynchronfahrmotoren ausgerüstet und damit zur Versuchslokomotive Be4/4 Nr. 12001 umgewandelt [7]. Die Bildung der Zwischenkreis-Gleichspannung aus der 16<sup>2</sup>/<sub>3</sub>-Hz-Netzspannung erfolgt mit einem anschnittgesteuerten Gleichrichter. Als erste serienmässig gebaute Umrichterfahrzeuge mit Asynchron-Fahrmotoren setzen die SBB zurzeit sechs diesel-elektrische Lokomotiven vom Typ Am6/6 mit einer Leistung von 1,5 MW in Betrieb.

Neuerdings werden auf fahrdrahtgespeisten Umrichter-lokomotiven pulsgesteuerte Stromrichter auch als Netzgleichrichter für die Bildung der Zwischenkreis-Gleichspannung eingesetzt, womit sich das Netzverhalten nachhaltig verbessern lässt [8]. Auf Grund der günstigen Versuchsergebnisse mit einem von Brown Boveri-Mannheim entwickelten Versuchs-fahrzeug gedenken die SBB, diese Technik auf neuen elektrischen sechsachsigen Rangierlokomotiven (Typ Ee6/6<sup>II</sup>) einzusetzen, welche im Laufe dieses Jahres in Auftrag gegeben werden sollen.

### 4. Rückwirkungen auf das speisende Netz

Zur experimentellen Untersuchung der Netzurückwirkungen und der Störbeeinflussungen von Stromrichter-Triebfahrzeugen haben die SBB 1973 mit Messungen auf der Doppelspur-

### Bauart der Testfahrzeuge

Tabelle II

Triebfahrzeug	Bauart (elektrisch)	Maximale Leistung
Streckenlokomotive Re4/4 <sup>II</sup> der SBB	konventionell (Stufenschaltwerk, Direktmotor)	6300 kW
Streckenlokomotive Re4/4 Nr. 161 der BLS	Anschnittsteuerung vierstufig	6720 kW
Vororttriebzug II RABDe8/16 der SBB	Anschnittsteuerung vierstufig	3266 kW
Versuchsfahrzeug DE 2500 der DB	Umrichter mit pulsgesteuertem Netzgleichrichter (Taktfrequenz 720 Hz)	1230 kW

strecke Winterthur–Gossau begonnen (Fig. 2). Die Energieversorgung erfolgte bei den meisten Versuchen einseitig vom Unterwerk Winterthur-Grüze, welches die relativ niedrige Leistung von 4×3 MVA aufweist. Zu Vergleichszwecken konnte die Versuchsstrecke durch Verbund mit dem Unterwerk Gossau auch zweiseitig gespeist werden. Der Einfluss der Triebfahrzeug-Bauart wurde anhand von Vergleichsmessungen mit zehn verschiedenen Fahrzeugtypen untersucht, wovon hier vier dargestellt werden (Tabelle II).

Von den im Unterwerk Winterthur-Grüze registrierten Fahrleitungsspannungen und -strömen wurden Höchstwert-Analysen durchgeführt. Die auf die Grundschwingung  $I_{1m}$  bezogenen Frequenzspektren des Netzstromes sind in Fig. 3 dargestellt. Es fällt auf, dass die Ströme aller vier Fahrzeuge im Bereich von 350–450 Hz relativ hohe Anteile aufweisen. Hierbei muss es sich offensichtlich um Resonanzerscheinungen im Netzstromkreis handeln. Das gleiche Merkmal ist in den Frequenzspektren der Netzspannung erkennbar. Einen interessanten Einblick in dieses Geschehen bot auch der Versuch mit dem Umrichterversuchsfahrzeug der Deutschen Bundesbahnen DE 2500. Wie Fig. 4 zeigt, treten beim Betrieb mit einem einzelnen Unterwerkstransformator im Bereich der Taktfrequenz (720 Hz) relativ niedrige Oberschwingungen auf. Hingegen fällt im Betrieb mit vier Unterwerkstransformatoren die Taktfrequenz praktisch mit der Resonanzfrequenz des Netzes zusammen, was in diesem Frequenzbereich zu ausserordentlich hohen Oberschwingungen führt.

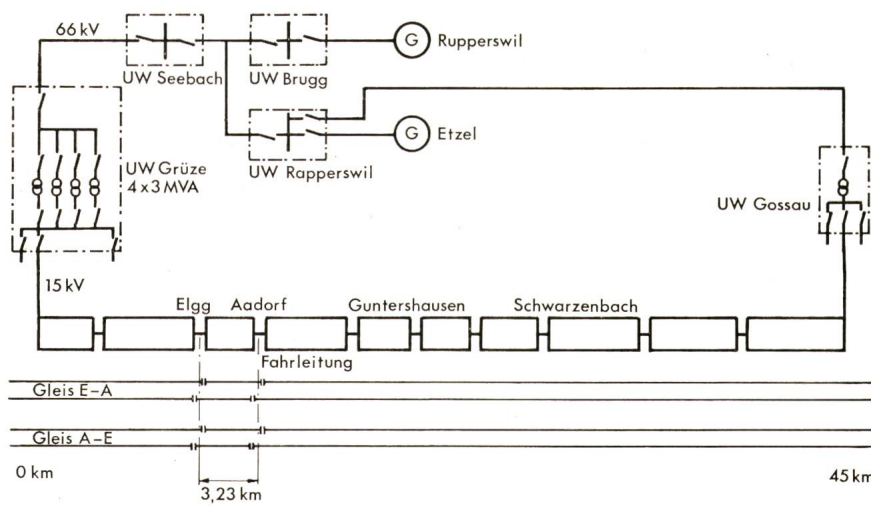


Fig. 2  
Versuchsstrecke Winterthur–Gossau. Schema der Fahrleitungsspeisung und der Schienenstromkreise  
UW Unterwerk

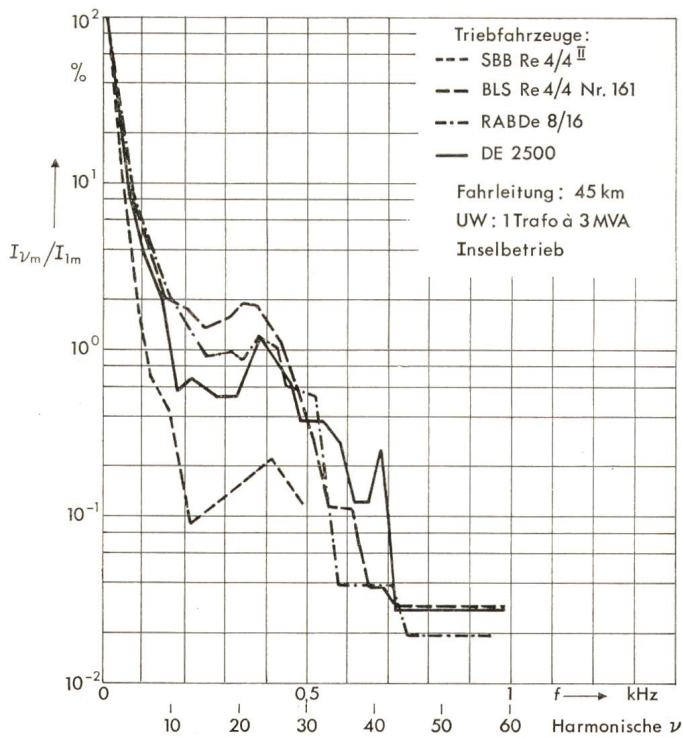


Fig. 3 Einfluss der Triebfahrzeugbauart auf den Fahrleitungsstrom im Unterwerk (maximale bezogene Oberschwingungsamplituden  $I_{vm}/I_{1m}$ )

Diese Feststellungen gaben den Anlass dazu, die Resonanzverhältnisse etwas systematischer in Abhängigkeit der Parameter an den Energieversorgungsanlagen und der Fahrleitung zu untersuchen. Hierfür wurden die Fahrleitungsströme der BLS-Lokomotive u. a. analysiert bei Speisung mit

- 1, 2 oder 4 Unterwerkstransformatoren im Inselbetrieb bei einer Fahrleitungslänge von 45 km (Fig. 5)
- 2 Unterwerkstransformatoren im Inselbetrieb bei einer Fahrleitungslänge von 9, 18 oder 45 km (Fig. 6)

Fig. 5 zeigt, dass die Resonanzfrequenz des Netzes mit wachsender Zahl parallel geschalteter Unterwerkstransforma-

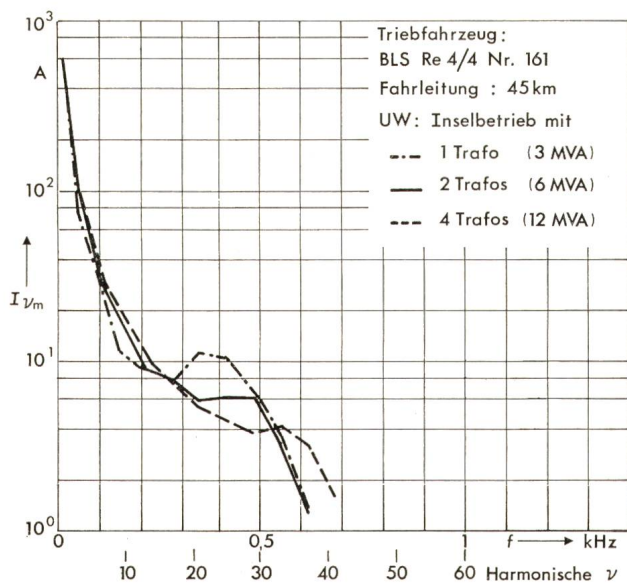


Fig. 5 Einfluss der Unterwerkleistung auf den Fahrleitungsstrom im Unterwerk (maximale Oberschwingungsamplituden  $I_{vm}$ )

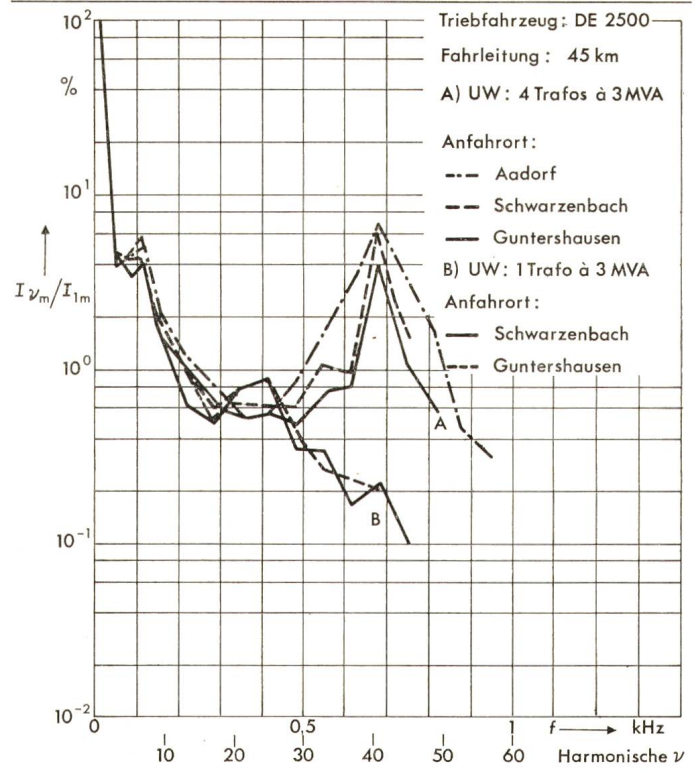


Fig. 4 Einfluss der Unterwerkleistung und des Anfahrortes auf den Oberwellengehalt des Fahrleitungsstromes im Unterwerk  $I_{vm}/I_{1m}$

toren, d. h. mit abnehmender Streuinduktivität, steigt. Demgegenüber geht aus Fig. 6 hervor, dass die Resonanzfrequenz mit wachsender Fahrleitungslänge, d. h. mit zunehmender Kapazität, sinkt. Der Schaltzustand der 66-kV-Übertragungsleitung (eine oder zwei Schleifen parallel geschaltet) wirkte sich auf die Lage der Resonanzfrequenz nicht wesentlich aus. Für die vom Triebfahrzeug-Stromrichter verursachten Oberschwingungen stellt das System Fahrleitung – Energieversorgung somit in erster grober Näherung einen von der Fahrleitungskapazität und den Transformator-Induktivitäten im Unterwerk gebildeten Parallelschwingkreis dar. Die Berechnung der

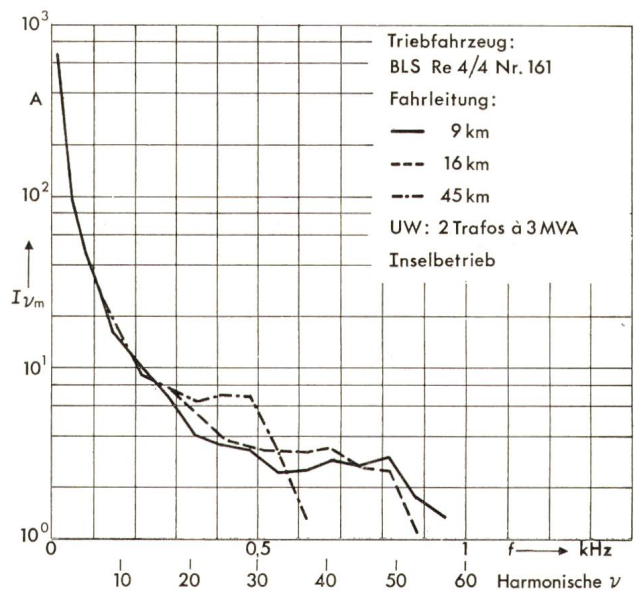


Fig. 6 Einfluss der Fahrleitungslänge auf den Fahrleitungsstrom im Unterwerk (maximale Oberschwingungsamplitude  $I_{vm}$ )

Schaltung gemäss Fig. 7	a)	b)	c)	d)
$I_{\text{Schiene}}/I_{\text{Fahrleitung}}$	28 %	17 %	15 %	11 %
$U_{\text{Gleis}}/I_{\text{Gleis}}$	14-15 V/100 A	0,17 V/100 A	0,17 V/100 A	0,12 V/100 A

entsprechenden Resonanzfrequenz ergibt eine gute Übereinstimmung mit den gemessenen Werten. Das beschriebene Ersatzschema ist jedoch nur näherungsweise gültig und beispielsweise nicht in der Lage, die Erscheinungen bei noch höheren Frequenzen oder bei Verbundbetrieb zu erklären. Genauere theoretische Aufschlüsse können nur von einem komplexen mathematischen Modell erwartet werden.

### 5. Störbeeinflussungen: Beispiel Schienenstromkreis

Die Störbeeinflussung von ortsfesten Anlagen wird im folgenden am Beispiel von sogenannten Schienenstromkreisen näher erläutert. Diese dienen im Eisenbahn-Sicherungswesen dazu, die Belegung von Gleisabschnitten durch Fahrzeuge zu erfassen. Man unterscheidet zwischen Schienenstromkreisen mit einer isolierten Schiene (unsymmetrisch) und solchen mit zwei isolierten Schienen (symmetrisch). Beide Ausführungsformen wurden auf der erwähnten Versuchsstrecke gemäss Fig. 7 je mit und ohne Erdung über spezielle Erdseile untersucht.

In Fig. 8 sind für den einschienig isolierten Schienenstromkreis ohne Erdseil (Fig. 7a) die von verschiedenen Triebfahr-

zeugtypen verursachten Störspannungen in Funktion der Frequenz dargestellt. In dieser Darstellung erblickt man ein Abbild der Netzstrom-Frequenzspektren der betreffenden Triebfahrzeuge (Fig. 3). Es sei insbesondere hervorgehoben, dass die Störspannungen am Schienenstromkreis vom Resonanzverhalten des Netzstromkreises massgeblich beeinflusst werden.

Anhand von Kurzschlussversuchen bei begrenzter Speiseleistung mit  $16^{2/3}$  Hz wurden für die vier Schienenstromkreis-Schaltungen die Schienenstromanteile und grundfrequenten Störspannungen gemäss Tabelle III gemessen.

Demnach ergibt sich durch den Übergang von Schaltung a) auf die Schaltungen b), c) und d) aus zwei Gründen eine Reduktion der Störbeeinflussung: Dank der verbesserten Erdrückführung über das Erdseil bzw. über zwei statt eine Schiene fliesst einerseits ein kleinerer Schienenstrom. Andererseits tritt wegen der besseren Symmetrie am zweischienig isolierten Schienenstromkreis bei gleichem Schienenstrom eine ca. 100-mal niedrigere Störspannung auf als bei der einschienig isolierten Anlage.

Den Einfluss der Schienenstromkreis-Schaltung auf die höherfrequenten Anteile der Störspannung am Gleis (bezogen auf den Gleisstrom) zeigt Fig. 9. Diese Analysen wurden aus Messungen mit der BLS-Thyristorlokomotive gewonnen. Bei den Schaltungen c) und d) (zweischienige Isolierung) ist ein frequenzselektives Verhalten erkennbar, welches vor allem durch die Abschlusskondensatoren an den Gleisdrosseln verursacht wird (Fig. 7). Insgesamt kann festgestellt werden, dass sich bei der zweischienigen Isolierung auch im höherfrequenten Bereich die Störspannungen um mindestens eine Zehnerpotenz verringern. Zum Vergleich ist in Fig. 9 noch eine Kurve von Messungen an einem zweischienig isolierten Stromkreis auf der Strecke Lausanne-Genève (Céligny) dargestellt.

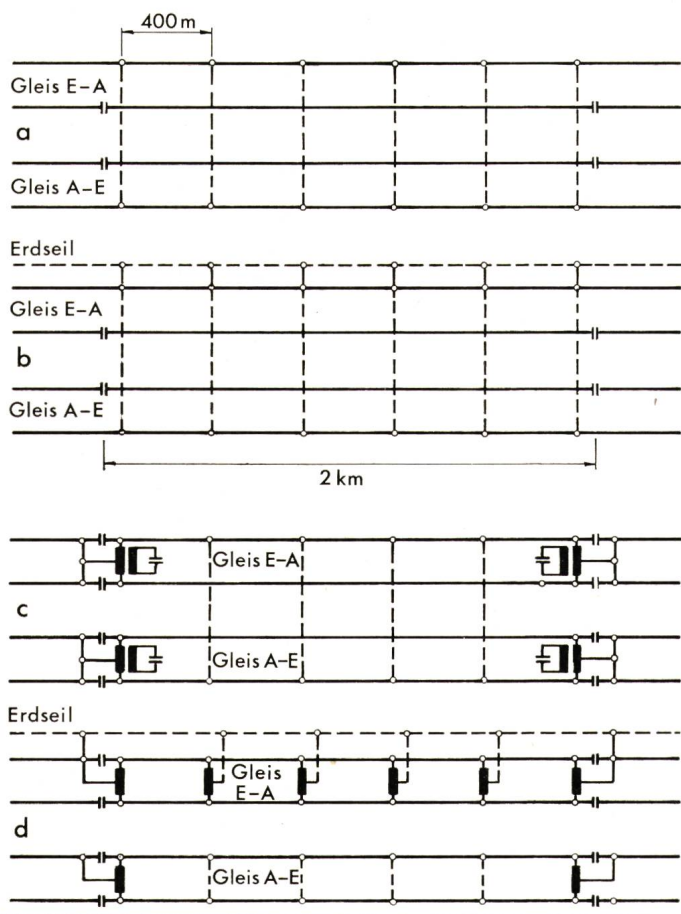


Fig. 7 Prinzipschaltungen der untersuchten Schienenstromkreise

- a) unsymmetrisch
- b) unsymmetrisch mit Erdseil
- c) symmetrisch
- d) symmetrisch mit Erdseil

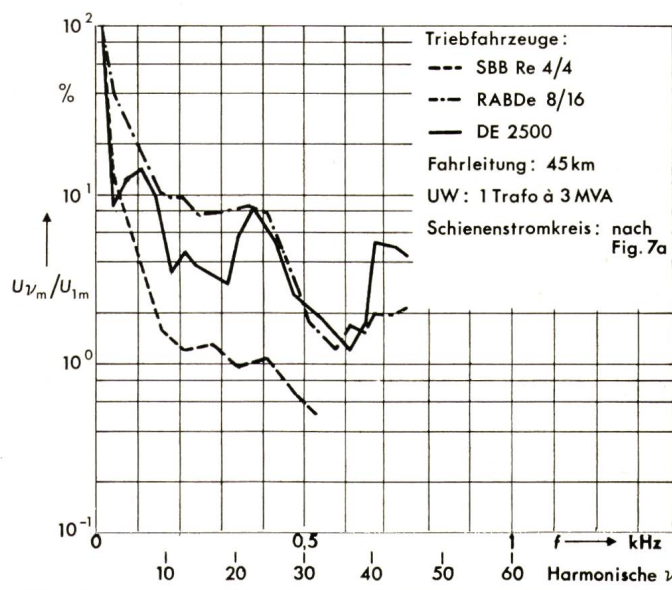


Fig. 8 Einfluss der Triebfahrzeugbauart auf die Störspannung am Gleis (maximale bezogene Oberschwingungsamplitude  $U_{v,m}/U_{1,m}$ )

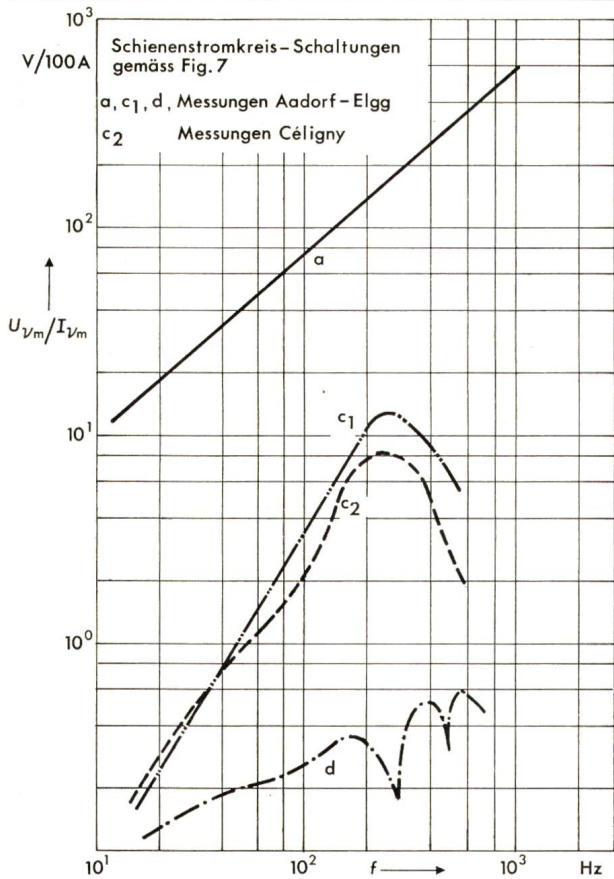


Fig. 9 Einfluss der Schienenstromkreisschaltungen auf die Störspannung am Gleis (maximale Störspannungsamplitude  $U_{vm}$  bezogen auf den Gleisstrom  $I_{vm}$ )

Aus diesen Beispielen folgt, dass die Störspannungen am Schienenstromkreis wohl in erster Linie ein Abbild von den Netzstrom-Oberschwingungen im betreffenden Abschnitt sind. Sie lassen sich jedoch durch gezielte Massnahmen an den Kopplungsmedien (verbesserte Erdung, Symmetrierung) erheblich verkleinern. Ähnliche Feststellungen gelten auch für die Störbeeinflussungen von Fernmeldeeinrichtungen. Auf die Massnahmen zur Verbesserung der Selektivität der gestörten Objekte wird hier nicht näher eingegangen. Im Zusammenhang mit den Schienenstromkreisen sei lediglich erwähnt, dass in neuerer Zeit Sende- und Empfangsgeräte entwickelt worden sind, welche sich durch Wechselströme praktisch nicht beeinflussen lassen [9].

## 6. Schlussfolgerungen, Ausblick

Mit den vorangehenden Ausführungen wurde versucht zu zeigen, dass das Problem der Störbeeinflussungen untrennbar mit den Rückwirkungen im speisenden Netz sowie mit dem Verhalten der Kopplungsmedien und der gestörten Objekte verbunden ist.

Dem Triebfahrzeug-Hersteller fällt selbstverständlich die Aufgabe zu, Triebfahrzeug-Stromrichter mit möglichst günstigem Netzverhalten zu bauen. Dies gilt nicht nur im Hinblick

auf die Störbeeinflussungen, sondern vor allem auch wegen der Rückwirkungen auf die Energieversorgungsanlagen. Solche Triebfahrzeugausrüstungen müssen jedoch auch anderen Forderungen (beschränktes Gewicht und Volumen, hohe Zuverlässigkeit, angemessene Beschaffungskosten usw.) genügen. Als zweckmässigste Schaltungen für schweizerische Verhältnisse haben sich bis heute anschnittgesteuerte Stromrichter in Mehrfach-Folgeschaltung erwiesen. Die SBB unternehmen grosse Anstrengungen zur Förderung der Entwicklung von noch netzfreundlicheren pulsgesteuerten Netzstromrichtern.

Heute sind die Netzzrückwirkungen einzelner Stromrichter-Triebfahrzeuge bei definierten Speiseverhältnissen genügend bekannt. Ziel der weiteren, vorwiegend theoretischen Untersuchungen wird es sein, möglichst genau die überlagerten Netzzrückwirkungen mehrerer gleichzeitig verkehrender Triebfahrzeuge bei verschiedenen Netzkonfigurationen zu bestimmen. Erst auf Grund dieser Unterlagen können verlässliche Richtlinien für die zukünftige Auslegung der Triebfahrzeuge und Energieversorgungsanlagen oder für die Neukonzipierung der verschiedenen beeinflussbaren Anlagen erstellt werden.

Bezüglich der Störbeeinflussung von Sicherungs- und Fernmeldeanlagen haben die bisherigen Untersuchungen gezeigt, dass sich die Störpegel durch gezielte Massnahmen an den Kopplungsmedien wirksam verkleinern lassen. Neu zu erstellende Anlagen dürften deshalb durch geeignete Wahl der verschiedenen Ausrüstungen (Erdungen, Kabel, Schienenstromkreise usw.) ohne wesentlichen finanziellen Mehraufwand «thyristorfest» gemacht werden können. Schwieriger wird es sein, bestehende Anlagen den Erfordernissen der Stromrichter-Traktion anzupassen. Hierfür müssen die Verhältnisse von Fall zu Fall abgeklärt und die jeweils zweckmässigsten Sanierungsmassnahmen, sei es an den Kopplungsmedien oder an den gestörten Objekten, gefunden werden.

## Literatur

- [1] E. Meyer: Was erwarten die Bahnen von der Anwendung von Thyristoren auf ihren Triebfahrzeugen. Beitrag zu der Diskussionstagung des SEV vom 3./4. November 1970 in Zürich. Bull. SEV 62(1971)1, S. 1...5.
- [2] H. Weber: Traktionsantriebe, Erfordernisse und Möglichkeiten. Neue Technik 16(1974)6, S. 199...215.
- [3] R. Zwicky: Theoretische Grundlagen der Beeinflussung von Schwachstromkreisen durch thyristorgespeiste Triebfahrzeuge. Beitrag zu der Diskussionstagung des SEV vom 3./4. November 1970 in Zürich. Bull. SEV 62(1971)1, S. 55...65.
- [4] W. Grossmann: Die Thyristor-Stromrichter-Lokomotive Re 4/4 161 der Berner Alpenbahn-Gesellschaft Bern-Lötschberg-Simplon (BSL). Bull. SEV 64(1973)7, S. 427...435.
- [5] A. Jäger, U. Baechler und B. Brom: Massnahmen zur Verbesserung des Netzverhaltens von Stromrichter-Triebfahrzeugen. Brown Boveri Mitt. 60(1973)12, S. 501...525.
- [6] P. Winter: Einfluss der Glättungs- und Kommutierungsreaktanzen auf das Netzverhalten von mehrfach-folgesteuerten Stromrichtern in einphasiger halbsteuerbarer Schaltung. Dissertation Nr. 4945 der Eidgenössischen Technischen Hochschule, Zürich, 1973.
- [7] M. Brechmüller und H. Stemmler: Probleme bei der Entwicklung und Auslegung eines Oberleitungsversuchsfahrzeugs mit Asynchronfahrmotoren. Elektr. Bahnen 43(1972)5, S. 106...116.
- [8] J. Körber: Grundlegende Gesichtspunkte für die Auslegung elektrischer Triebfahrzeuge mit asynchronen Fahrmotoren. Elektr. Bahnen 45(1974)3, S. 52...59.
- [9] E. Hojstetter: Optimale Wahl der Signalfrequenz für Gleisstromkreise bei 16 $\frac{2}{3}$ -Hz-Traktion. Bull. SEV/VSE 65(1974)5, S. 357...363.

## Adressen der Autoren

Dr. sc. techn. Jakob Huber, Chef des Elektrotechnischen Studienbüros, Bauabteilung, SBB Generaldirektion, 3000 Bern.

Dr. sc. techn. Peter Winter, Abteilung Zugförderung, SBB Kreisdirektion III, 8021 Zürich.