Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke

Band: 62 (1971)

Heft: 1

Artikel: Rückwirkung der Thyristorsteuerung für Gleich- und Wechselstrombahnen auf Fernmelde- und Signalanlagen

Autor: Buckel, R.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-915791

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: 09.07.2025

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

Rückwirkung der Thyristorsteuerung für Gleich- und Wechselstrombahnen auf Fernmelde- und Signalanlagen

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

von *R. Buckel,* München

621.314.632.049:621.335

1. Vorbemerkung

Die theoretischen und praktischen Untersuchungen über die Rückwirkung der Thyristorsteuerung elektrischer Triebfahrzeuge auf Fernmelde- und Signalanlagen sind noch in vollem Gange. Der vorliegende Bericht enthält die wichtigsten Ergebnisse nach dem Stand vom Juli 1970.

Während im Wechselstrombetrieb ohne Stromrichterfahrzeuge lediglich Magnetisierungs- und Nutenharmonische, gelegentlich auch Oberschwingungen infolge von Einschwingvorgängen zu beachten waren, im Gleichstrombetrieb im wesentlichen nur die von den ortsfesten Gleichrichtern erzeugten Schwingungen, deren Beherrschung bei beiden Bahnsystemen kaum nennenswerte Schwierigkeiten bereitete, treten bei der Thyristorsteuerung zusätzliche Schwingungen in grossem Umfange auf. Sie umfassen bei Wechselstrom das gesamte Frequenzspektrum bis über den tonfrequenten Bereich hinaus, bei Gleichstrom dagegen meist nur ein bestimmtes Frequenzgebiet oder einige wenige, jedoch stark ausgeprägte Schwingungen

2. Beeinflusste Anlagen

Signalanlagen werden zufolge ihrer Betriebsweise gewöhnlich nur durch einzelne diskrete Frequenzen beeinflusst, während in der Fernmeldetechnik das ganze Frequenzspektrum von Bedeutung sein kann. Die wichtigsten Anlagen in der Signaltechnik sind die Gleisstromkreise mit ein- oder zweischieniger Isolierung (Fig. 1 und 2).

Am Anfang des zu überwachenden Gleisabschnittes wird der Blockstrom eingespeist, am Ende liegt im Ruhestrombetrieb (freier Abschnitt) ein Relais. Bei Gleisbesetzung wird das Relais kurzgeschlossen, es fällt ab.

Der einschienige Gleisstromkreis kann mit Gleich- oder Wechselstrom gespeist werden, der zweischienige über Drosselstösse nur mit Wechselstrom. Die Deutsche Bundesbahn verwendet einschienige Kreise in Bahnhöfen, zweischienige auf der freien Strecke, und betreibt beide mit Wechselstrom.

Das Zweiphasen-Motorrelais ermöglicht einen sehr frequenzselektiven Betrieb. Ein Drehmoment wird auf den Relaisanker nur ausgeübt, wenn die Frequenzen in beiden Wicklungen übereinstimmen und um etwa 90° phasenverschoben sind. Schon Frequenzabweichungen von mehr als 2 Hz erzeugen in dem trägen Anker kein Nutzdrehmoment mehr, er pendelt nur mehr, ohne die Kontakte zu schliessen.

Ohne Isolierstösse arbeiten Tonfrequenz-Gleisstromkreise, die unter Ausnutzung der Schieneninduktivität (L/2) mit einem Kondensator (C) auf Resonanz abgestimmt sind (Fig. 3).

Von den einschienigen Gleisstromkreisen abgesehen könnte die Frequenz des Blockstromes grundsätzlich mit der des Triebstromes oder einer seiner Harmonischen zusammenfallen, wenn der Rückstrom in beiden Schienensträngen stets gleich gross wäre. Dies ist aber wegen unvermeidbarer Wi-

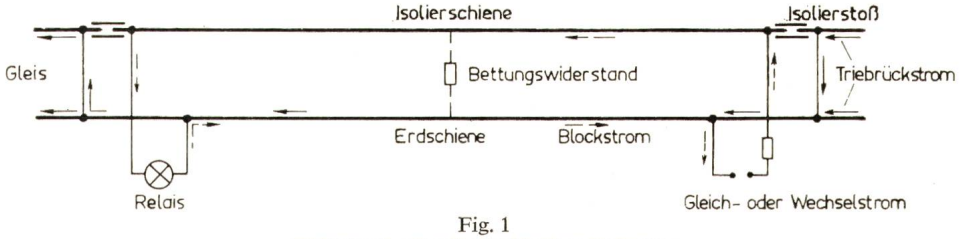


Fig. 1
Gleisstromkreis mit einschieniger Isolierung

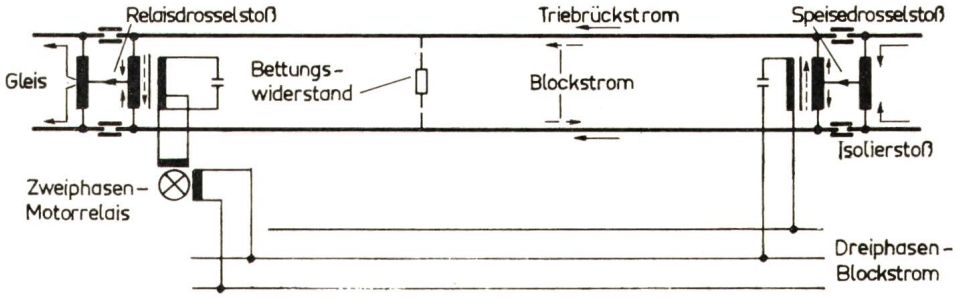


Fig. 2
Zweischienige Isolierung mit Drosselstössen und Zweiphasen-Motorrelais

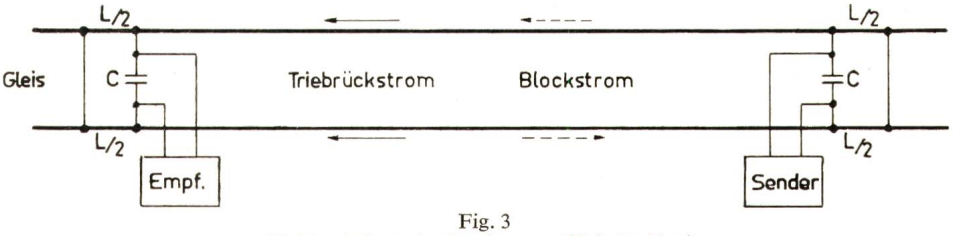


Fig. 3
Elektronischer oder Tonfrequenz-Gleisstromkreis

derstandsunterschiede in den Schienen und meist verschiedener Ableitung nie sichergestellt, so dass für den Blockstrom eine Frequenz benutzt werden muss, die weder mit der des Triebstromes noch mit der einer seiner starken Harmonischen zusammenfällt. Bei 16⅔ Hz wird deshalb meist ein Strom von 100 Hz verwendet. Diese Frequenz entspricht zwar der 6. Harmonischen, die sich aber nur kurzzeitig mit kleiner Amplitude bei Einschwingvorgängen ausbildet. Bei 50 Hz wäre dies jedoch die 2. Harmonische, die beim Leereinschalten von Triebfahrzeugtransformatoren noch sehr stark erscheint; in diesem Bahnnetzen sind daher gewöhnlich 75 oder 125 Hz in Gebrauch. Bei gleichzeitigem Gleich- und Wechselstrombetrieb, z. B. in Systemwechselbahnhöfen, können infolge einer Gleichstrom-Vormagnetisierung von Transformatoren geradzahlige Harmonische schon im normalen Fahrbetrieb auftreten; deswegen weicht man dort bei 16⅔-Hz-Bahnen auf 42 Hz aus.

Auch in Fernmeldeanlagen sind geringe unvermeidbare Unsymmetrien, hier in den beiden Adern eines Übertragungssystems, die Ursache für Störungen durch Oberschwingungen, die sich z. B. als Geräusche beim Fernsprechen oder als Störimpulse bei der Datenübertragung bemerkbar machen. Selbst in erdfreien Stromkreisen genügen geringfügige Unterschiede in den Längswiderständen der beiden Adern oder in deren Erdkapazitäten, dass bei gleich hohen induzierten Längsspannungen in den beiden Adern an den Enden der Leitung Querspannungen in der Grössenordnung von mV entstehen, die als Geräusch hörbar sind. Dazu kommen noch die meist höheren Unsymmetrien der Teilnehmer- und Amtsschaltungen mit Erdbeziehung.

Im Gegensatz zu den Signalanlagen ist beim Fernsprechen das ganze im Hörbereich liegende Frequenzspektrum von mindestens 300 bis 3000 Hz zu berücksichtigen, und zwar bewertet nach der Empfindlichkeit von Ohr und Fernsprechhörer für die einzelnen Frequenzen. Ein Mass für diese Art Störung ist der Störstrom in der Starkstromanlage (Lokomotive, Fahrleitung), der bei Kenntnis der Amplituden der einzelnen störenden Harmonischen über die Bewertung (Störgewicht) berechnet oder einfacher mit Hilfe des Psophometers, das den Frequenzgang von Ohr und Hörer nachbildet, gemessen werden kann. Die Beträge der einzelnen Frequenzen werden leistungsmässig addiert. Dem Störstrom entsprechend, der für die Berechnung induktiver Vorgänge massgebend ist, lässt sich die Störspannung bestimmen, deren Grösse zur Berechnung der kapazitiven Geräusch-Beeinflussung von Fernmeldefreileitungen bekannt sein muss. Störstrom und Störspannungen sind der Starkstromanlage zugeordnete Grössen.

3. Wechselstrombahnen

Die bei Wechselstrombahnen mit Thyristoren mögliche Periodensteuerung, bei der volle Perioden ausgewählt oder gesperrt werden und der Mittelwert der zu regelnden Spannung von der Zahl der ausgesteuerten Perioden abhängt, bringt Vorteile hinsichtlich der Belastung des speisenden Hochspannungsnetzes und der Unterdrückung der höheren Harmonischen mit sich. Bei dieser Steuerungsart werden jedoch sehr starke niedere Harmonische und Unterharmonische erzeugt, die einen ungestörten Betrieb der üblichen, niederfrequenten Gleisstromkreise unmöglich machen würden. Auch wird bei dieser Technik die Schleudergefahr erhöht,

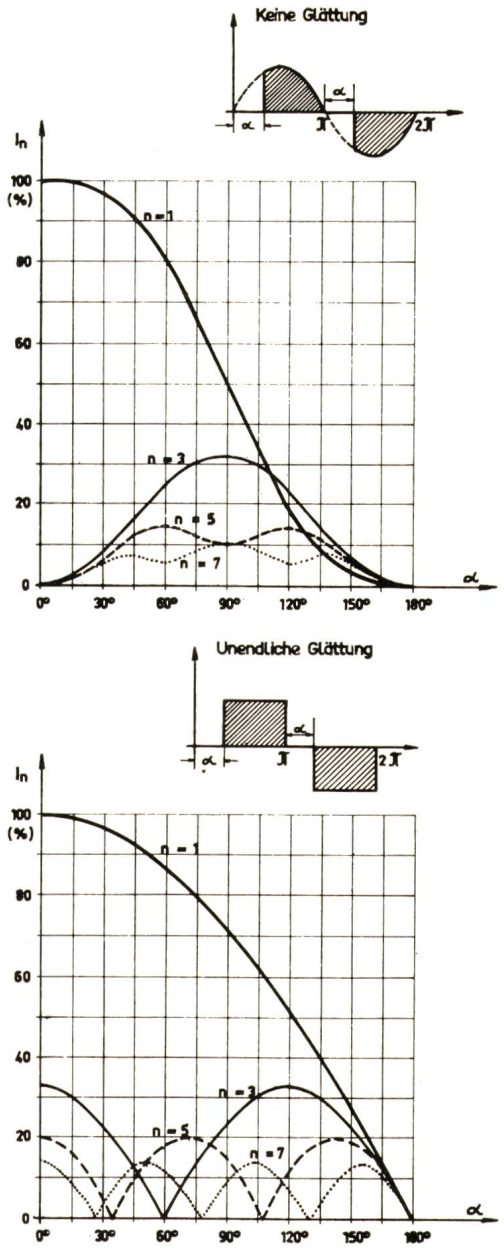


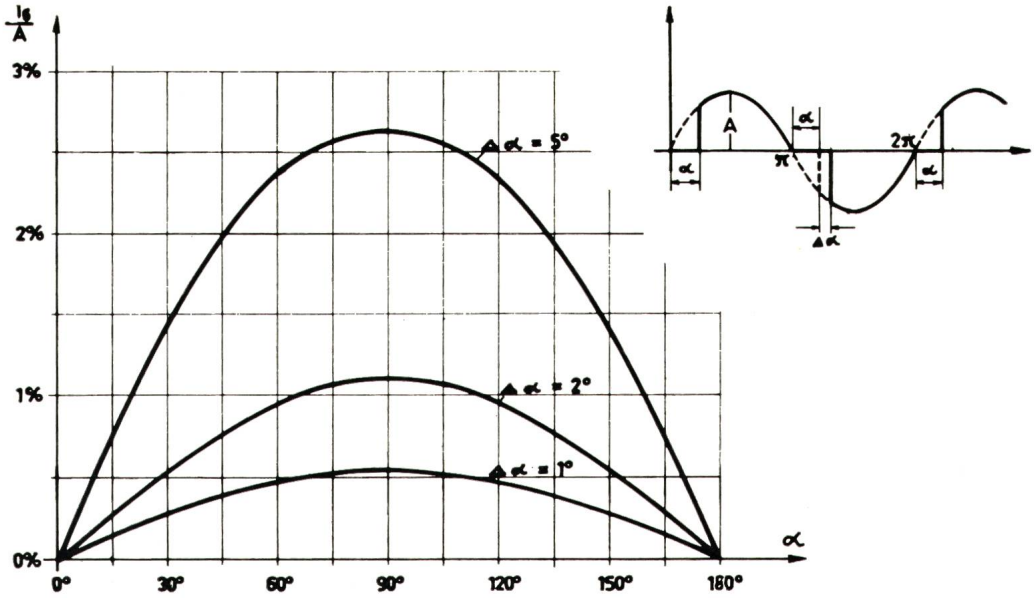
Fig. 4
Fourieranalyse bei Anschnittsteuerung
(Ungeradzahlige Harmonische)
I_n Strom; n Ordnungszahl der Harmonischen; α Zündwinkel

so dass auf diesem Gebiet nach einigen Vorversuchen nicht weitergearbeitet wurde.

Bei der Phasen- oder Anschnittsteuerung wird ein mehr oder weniger grosser Teil der Gesamtzeit einer Halbschwingung der Wechselspannung als stromführend zugelassen, so dass Spannung und Drehzahl sehr feinstufig geregelt werden können. Durch die gleichzeitige Gleichrichtung des Motorstromes sind die Harmonischen des Oberstromes (Fahrdrahtstromes) von der Glättung im Motorkreis abhängig. Der dem Netz entnommene Strom wird daher eine Form annehmen, die zwischen einer angeschnittenen Sinuswelle und einer Rechteckwelle liegt. Die Zerlegung dieser beiden Stromformen nach Fourier zum Ermitteln der Harmonischen des Stromes in Abhängigkeit vom Aussteuerungswinkel zeigt Fig. 4.

Hierbei kommen nur ungeradzahlige Harmonische, also ganze ungeradzahlige Vielfache der Grundschwingung, vor.

Fig. 5
Einfluss von Zündwinkelunsymmetrien auf die 6. Harmonische
I_6 Strom der 6. Harmonischen; α Zündwinkel



Ist der Aussteuerungswinkel für beide Halbschwingungen nicht gleich, dann entstehen zusätzlich geradzahlige Harmonische (Kennzeichen für geradzahlige Harmonische: Die beiden gleichgerichteten Halbschwingungen können nicht zur Dekkung gebracht werden, d. h. ihre Flächen sind nicht identisch). Die Abhängigkeit einer geradzahligen Harmonischen — hier der 6. — vom Zündwinkelunterschied $\Delta\alpha$ ist, bezogen auf die Grundschwingung (1. Harmonische), in Fig. 5 wiedergegeben.

Vom nie ganz vermeidbaren Zündwinkelunterschied abgesehen, müssen geradzahlige Harmonische beim Regelvorgang auftreten; denn die feinstufige Regelmöglichkeit ist ja der Sinn der Anschnittsteuerung. Man kann überschläglich aussagen, dass selbst bei schnellem Hochsteuern und Beschleunigen bei 16⅔ Hz der Winkelunterschied nicht grösser als 1° sein wird. Beim Schleudervorgang wird schneller ausgeregelt, das hat grössere Unsymmetrien zur Folge, jedoch nur kurzzeitig. Wie diese Oberschwingungsverhältnisse in der Praxis aussehen, zeigen die Fig. 6...8.

In Fig. 6 sind die 1. bis 7. Harmonischen in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit aufgezeichnet, es sind also keine echten Nullstellen vorhanden, wie dies theoretisch bei vollständiger Glättung des Motorstromes (Fig. 4, unten) der Fall wäre. Bei dieser Lokomotive (Fig. 6) waren keine Massnahmen zur Zündwinkelsymmetrierung getroffen, die geradzahligen Harmonischen sind mit max. 3 % der Grundschwingung bei Vollaussteuerung noch verhältnismässig gross.

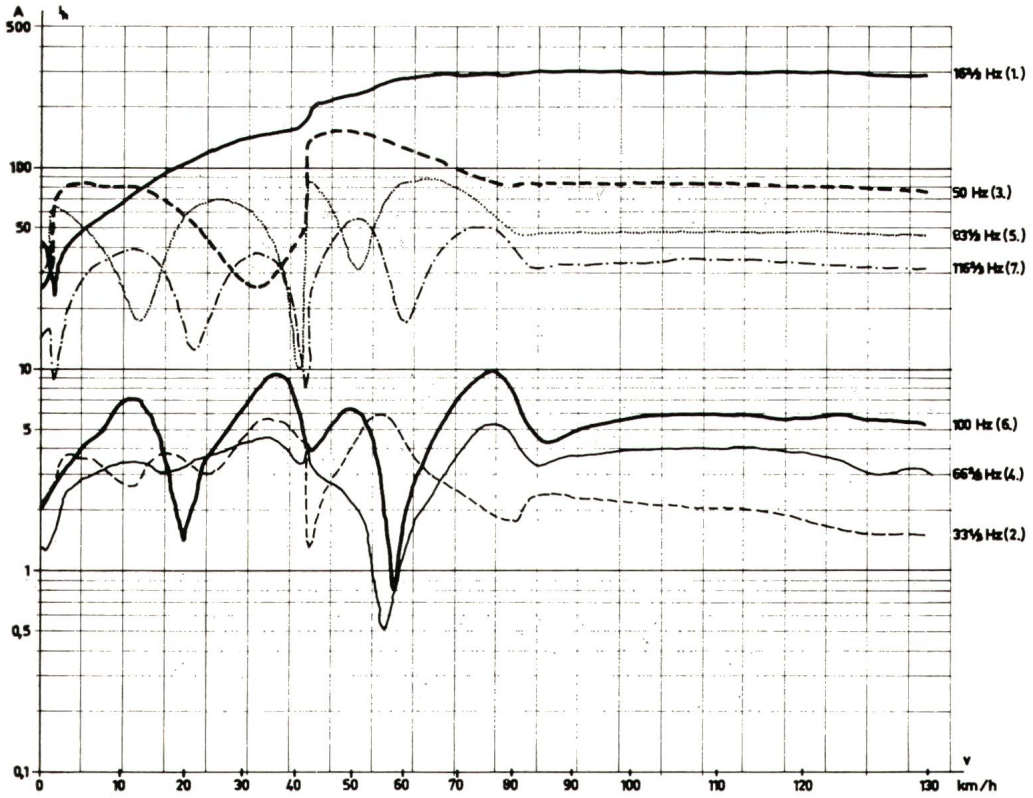


Fig. 6
Frequenzanalyse des Fahrstromes einer Thyristorlokomotive
(3600 kW, 16⅔ Hz), 1. ...7. Harmonische
I_h Strom der Harmonischen; v Geschwindigkeit

Fig. 7 soll als Beispiel dafür dienen, wie ausserordentlich stark die Harmonischen, hier nur die ungeradzahligen, ihrem Aussteuerungswinkel entsprechend, schwanken können.

Von besonderem Interesse ist Fig. 8, wo die Maximalwerte der geradzahligen und ungeradzahligen Harmonischen einer Thyristorlokomotive im Vergleich mit den Harmonischen einer amplitudengesteuerten Dioden- und Einphasenlok dargestellt sind. Auf weitere Einzelheiten dieser Figur wird später noch eingegangen werden.

Vergleichende Messungen der Harmonischen bei 50 Hz haben ergeben, dass die Relativwerte der Harmonischen, bezogen auf dieselbe Ordnungszahl, bei 16⅔ und 50 Hz etwa gleich gross sind, wenigstens was die ungeradzahligen betrifft.

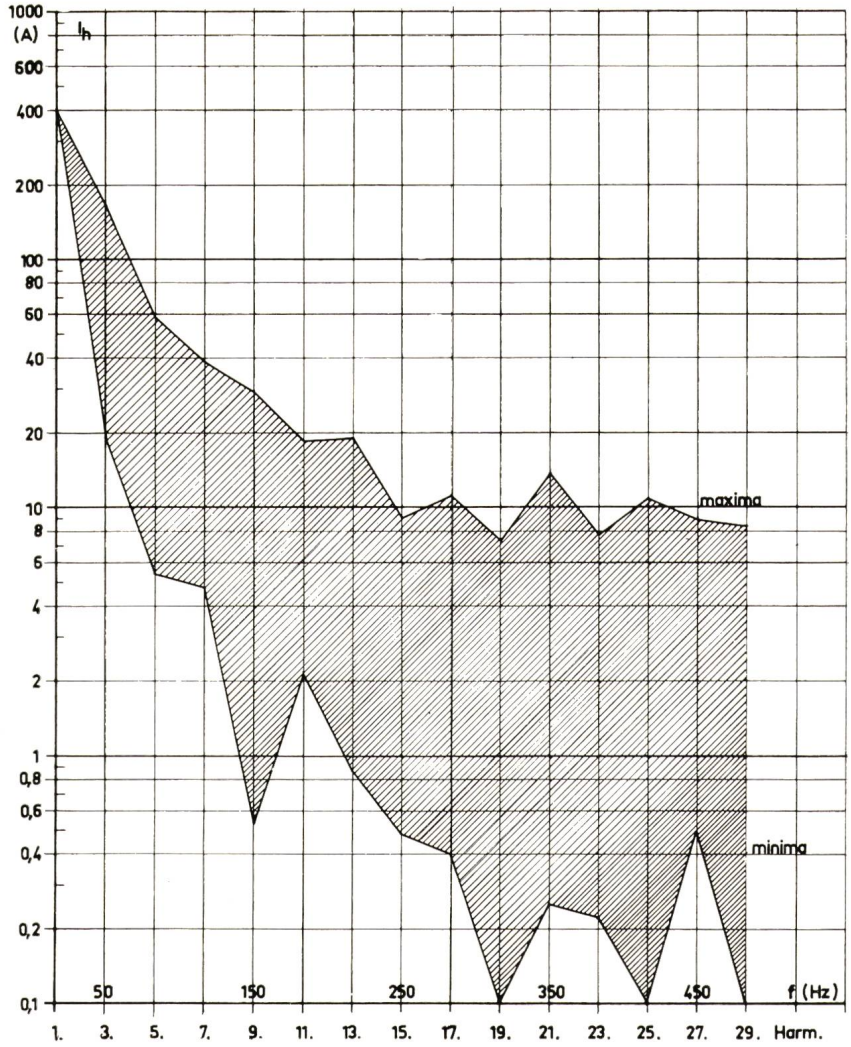


Fig. 7
Oberschwingungen einer Thyristorlokomotive
(5100 kW, 16⅔ Hz)
Streubereich der ungeradzahligen Harmonischen

Aus dem Verlauf der Harmonischen in den Fig. 7 und 8 könnte geschlossen werden, dass die Amplituden der höheren ungefähr nach einer e- Funktion abnehmen. Ab etwa 500 Hz bis zu einigen kHz zeigen jedoch sowohl die ungeradzahligen als auch die geradzahligen Harmonischen mit etwa 0,1 bis 0,2% der Grundschwingung einen angenähert gleichbleibenden Verlauf.

Diese für Geräusche in Fernsprechanlagen massgebenden Harmonischen werden zweckmässig im Störstrom, also im frequenzbewerteten Strom zusammengefasst, durch den am einfachsten die Störwirkung des thyristorgesteuerten Triebfahrzeuges bei verschiedenen Schaltungen und Betriebszuständen gekennzeichnet werden kann.

Bisher liegen aber noch nicht genügende Messergebnisse vor, um eine sichere allgemein gültige Aussage über den Störstrom einer Thyristorlokomotive machen zu können. Die Einflussgrössen sind, wie die späteren Ausführungen zeigen werden, sehr umfangreich und noch nicht alle geklärt. Als vorläufigen Richtwert wird man bei Fahrzeugen mittlerer Leistung mit einem Störstrom von etwa 3 A bei 16⅔ Hz und 8 A bei 50 Hz rechnen dürfen; das sind Werte, die im Mittel das 30-fache einer Einphasenlokomotive und das 5fache einer Diodenlokomotive mit Amplitudensteuerung betragen.

Die Verzerrung der Fahrdrahtspannung infolge der Stromharmonischen und deren Rückwirkung auf das überlagerte Hochspannungsnetz hängt wesentlich von der Art der Speisung ab. Die 16⅔-Hz-Netze der Deutschen, Österreichischen und Schweizer Bundesbahnen werden aus einem eigenen 110- oder 60-kV-Hochspannungsnetz gespeist, das wegen des hohen Blindleistungsbedarfs für die Magnetisierung der Transformatoren in den Unterwerken und Triebfahrzeugen bereits eine von der Sinusform abweichende Spannungskurve liefert, die hauptsächlich durch die 3., 5. und 7. Harmonische bestimmt wird. Die Belastung durch wenige thyristorgesteuerte Triebfahrzeuge macht sich daher hinsichtlich der Harmonischen niederer Ordnungszahl nicht besonders bemerkbar, zudem die Phasenlage verschieden sein kann.

Die höheren Harmonischen, die eine Störspannung im Fahrleitungsnetz von etwa 2 bis 5 % zur Folge haben — genauere Messergebnisse liegen hierüber noch nicht vor —, werden fast ungedämpft in das Hochspannungsnetz übertragen, das dadurch ein echter Störer durch kapazitive Beeinflussung benachbarter Fernmeldefreileitungen werden kann. Bisher war die Störspannung des Hochspannungsnetzes so gering (etwa 0,2 ‰), dass diese Beeinflussungsart vollkommen vernachlässigt werden konnte.

In Norwegen und Schweden ist eine Rückwirkung auf das speisende Hochspannungs-(Drehstrom-)Netz ausgeschlossen, weil das Fahrleitungsnetz ausschliesslich unmittelbar aus Umformern gespeist wird.

Im 50-Hz-Betrieb macht die einphasige Bahnlast nur einen kleinen Teil der gesamten Drehstrom-Netzleistung aus. Frühere Untersuchungen haben schon ergeben, dass die Rückwirkung der Harmonischen niederer Ordnungszahl in tragbaren Grenzen bleibt, wenn die Bahnlast nicht mehr als 5 % der Kurzschlussleitung des Drehstromnetzes beträgt. In wieweit die höheren Harmonischen thyristorgesteuerter Fahrzeuge hier zu Störungen Anlass geben können, bedarf noch genauerer Untersuchungen.

3.1 Weitere Einflussgrössen bei Anschnittsteuerung

Bei den Prototypen der Triebfahrzeuge waren 3 und 4 Brücken in Folgesteuerung verwendet worden, um Leistungsfaktor und Oberschwingungen klein zu halten. Im Fall der Mehrbrückensteuerung wird zwar öfters mit einer vollausgesteuerten Brücke oder mehreren gefahren, doch bleibt immer noch ein Restwinkel wegen der Kommutierung erhalten. Alle darauf abgestellten Untersuchungen wiesen aber auf keine eindeutige Abhängigkeit der Harmonischen oder des Störstromes von der Brückenzahl hin. Nur der Übergang auf eine einzige Brücke lässt, zum mindesten beim Anfahren, den Störstrom beträchtlich ansteigen (Fig. 9).

Die Art der Brückenschaltung — symmetrisch oder unsymmetrisch, d. h. voll- oder halbgesteuert — scheint nach

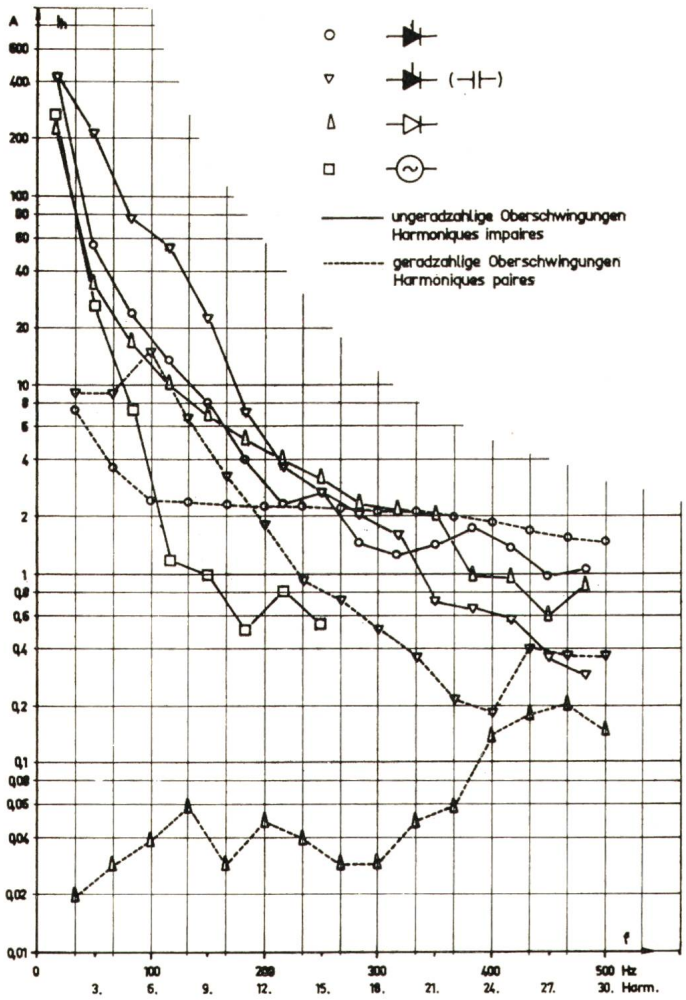


Fig. 8
Harmonische (Maximalwerte) von Thyristor-, Dioden- und Einphasenlokomotive
f Frequenz; I_h Strom der Harmonischen

den bisherigen Untersuchungen ebenfalls nicht von ausschlaggebendem Einfluss auf die Oberschwingungen zu sein. Dies gilt auch für die vollgesteuerte Brücke bei Stromrückgewinnung (Nutz- oder Netzbremse).

Die verschiedene Aussteuerung von Motortypen eines Fahrzeuges ist eine weitere Quelle für die Zunahme der Oberschwingungen und des Störstromes. Diese asynchrone Steuerung kann von Vorteil sein, um das Fahrverhalten (Schleudern) zu verbessern.

Störungen in der Thyristorsteuerung können das Oberschwingungsbild vollkommen verändern. Der Ausfall eines Brückenzweiges z. B. hat eine Halbweggleichrichtung zur Folge, bei der das Fahrzeug noch ohne weiteres betriebsfähig ist. Die Halbweggleichrichtung erzeugt aber geradzahlige Harmonische mit viel grösseren Amplituden, als durch Zündwinkelunterschiede oder rasche Regelvorgänge entstehen.

Da das Fahrzeug mit Anschnittsteuerung einerseits ein Oberschwingungsgenerator ist, der hohe Frequenzen erzeugt, und anderseits die Fahrleitung im speisenden Unterwerk für diese Frequenzen nicht mit ihrem Wellenwiderstand abgeschlossen ist, bilden sich stehende Wellen aus (Wellenausbreitung). Infolge der Vielzahl und Stärke der einzelnen Harmonischen ist immer damit zu rechnen, dass für wenigstens eine dieser Schwingungen die Resonanzbedingung gegeben ist. Aus dem Verlauf des Störstromes, über die Abschnittslänge aufgetragen, lassen sich diese Erscheinungen bei genau gleichzeitiger Messung im Fahrzeug und Unterwerk gut verfolgen (Fig. 10). Der Unterschied zwischen der Grösse des Störstromes in der Erdungsschiene des Unterwerks (c) und in der Fahrleitung im Unterwerk (b) lässt sich zwanglos dadurch erklären, dass die sonstigen an der 15-kV-Sammelschiene des Unterwerks angeschlossenen Speiseleitungen und -kabel sowie die Erdkapazitäten von Geräten und Anlagen einen Kondensator darstellen, der in der Ersatzschaltung parallel zur 15-kV-Wicklung des Transformators liegt. Das Gerät «c» befindet sich so im induktiven Zweig des Resonanzkreises und zeigt deshalb höhere Werte an als das Gerät «b» im Fahrleitungsabzweig. Bei Annäherung des Triebfahrzeuges an das Unterwerk wäre zu erwarten, dass die Störströme «a» und «b» gleich gross werden. Eine Erklärung für diesen Unterschied wird dadurch möglich, dass ja die Fahrleitung zwischen dem Standort des Fahrzeuges und dem Ausgangspunkt der Fahrt leerläuft, wodurch sich in diesem

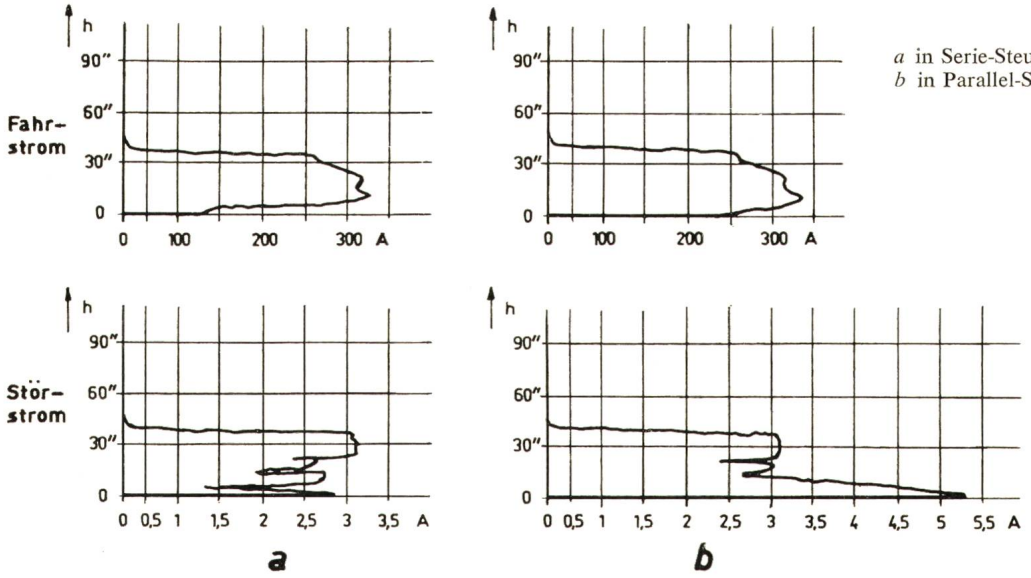


Fig. 9
Zwei Brücken
a in Serie-Steuerung (Folgesteuerung mit 2 Brücken)
b in Parallel-Steuerung (Steuerung mit 1 Brücke)

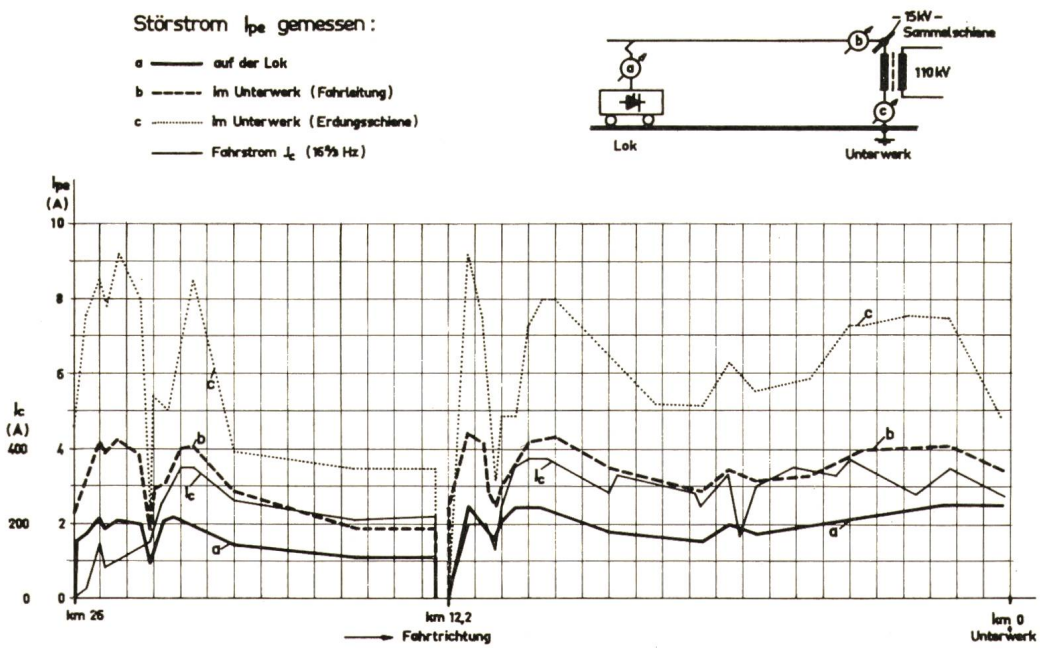


Fig. 10
Grösse und Verlauf des Störstromes bei Fahrt einer Thyristorlokomotive
(3200 kW, 16⅔ Hz)
I_c Fahrdrahtstrom

auf etwa 1° zu begrenzen. In einem untersuchten Fall konnte für die 6. Harmonische ein Minimum von etwa 0,1 % des höchsten Fahrstromes erreicht werden; nur beim Übergang von der 1. zur 2. Brücke stieg der Betrag kurzzeitig auf 0,5 %.

Die höheren Harmonischen werden wirkungsvoll durch Kondensatoren auf der Sekundärseite des Triebfahrzeugtransformators, also parallel zum Eingang der Stromrichterbrücke, gedämpft. Allerdings steigen dabei die niederen Harmonischen, auch die geradzahligen stark an. (In Fig. 8 zeigen die Kurven, die durch auf die Spitze gestellte Drei-

Kreis wieder andere Resonanzen ausbilden. Hierbei liegt das Gerät «b» im Parallelresonanzkreis, das Instrument «a» dagegen in der Zuleitung zu diesem Kreis.

Während die bisher geschilderten Einflussgrössen Harmonische der Grundschwingung zur Folge hatten, kann es unter bestimmten Bedingungen auch zu freien Oberschwingungen kommen, die kein ganzes Vielfaches der Grundschwingung zu sein brauchen. Solche Schwingungen entstehen bevorzugt durch plötzliche Stromänderungen und regen das speisende Netz zu Resonanzschwingungen an. In den im Unterwerk aufgenommenen Stromoszillogrammen ist bei jedem Zünden der Stromhalbwelle die Resonanzfrequenz des Fahrleitungsnetzes gut zu erkennen (Fig. 11 und 13). Mit noch grösserer Amplitude ist den Spannungskurven in Fig. 11 eine 180-Hz-Schwingung überlagert, die immer beim Nulldurchgang des angeschnittenen Stromes entsteht.

Die nämliche Schwingung war in der wiederkehrenden Spannung enthalten, als bei gleichem Netzzustand ein Kurzschluss geschaltet wurde (obere Hälfte in Fig. 11). Diese Schwingung wurde bevorzugt durch die Charakteristiken des speisenden 110-kV-Netzes erzeugt, das versuchsweise im «Inselbetrieb» arbeitete, wobei die Leistung des speisenden Generators nur wenig grösser als die der 3 gleichzeitig fahrenden Thyristorlokomotiven war. Speiste das ganze 110-kV-Netz den Versuchsabschnitt, so war infolge der kleineren inneren Induktivität des Netzes die Resonanzfrequenz höher und wies viel kleinere Amplituden auf.

3.2 Massnahmen zur Dämpfung der Oberschwingungen

Durch eine Symmetrierung des Zündwinkels, d. h. durch Herabsetzen des Zündwinkelunterschiedes $\Delta\alpha$ (Fig. 5), können die geradzahligen Harmonischen verringert werden. Wenn auch noch keine genauen Unterlagen hierüber vorliegen, so scheint es möglich zu sein, den Winkelunterschied

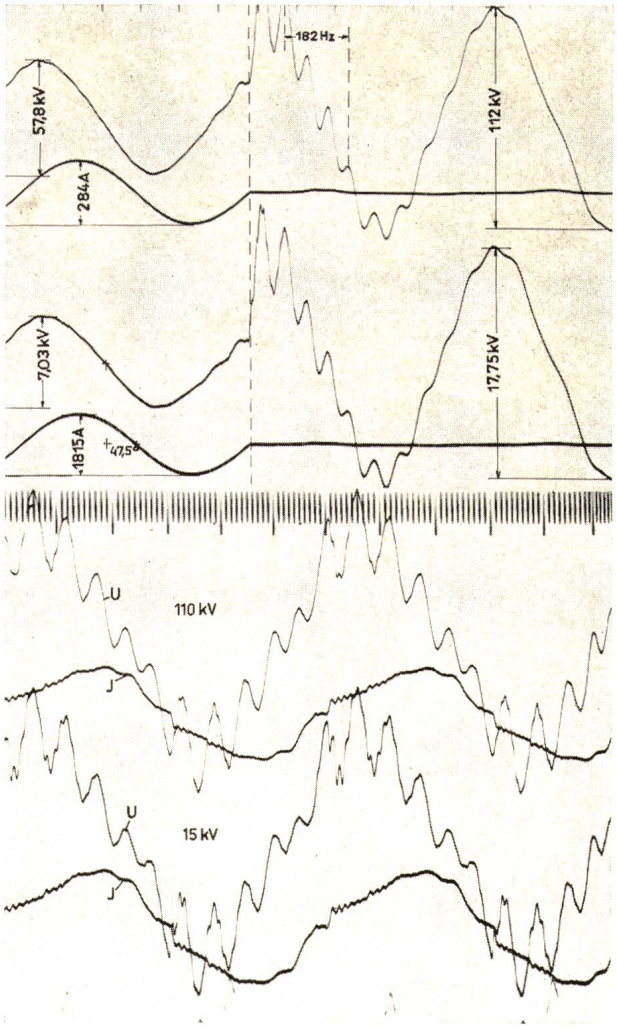


Fig. 11
Kurzschluss- (oben) und Fahrstrom- (unten) Oszillogramme, 110-kV-Netz im Inselbetrieb
U Netzspannung

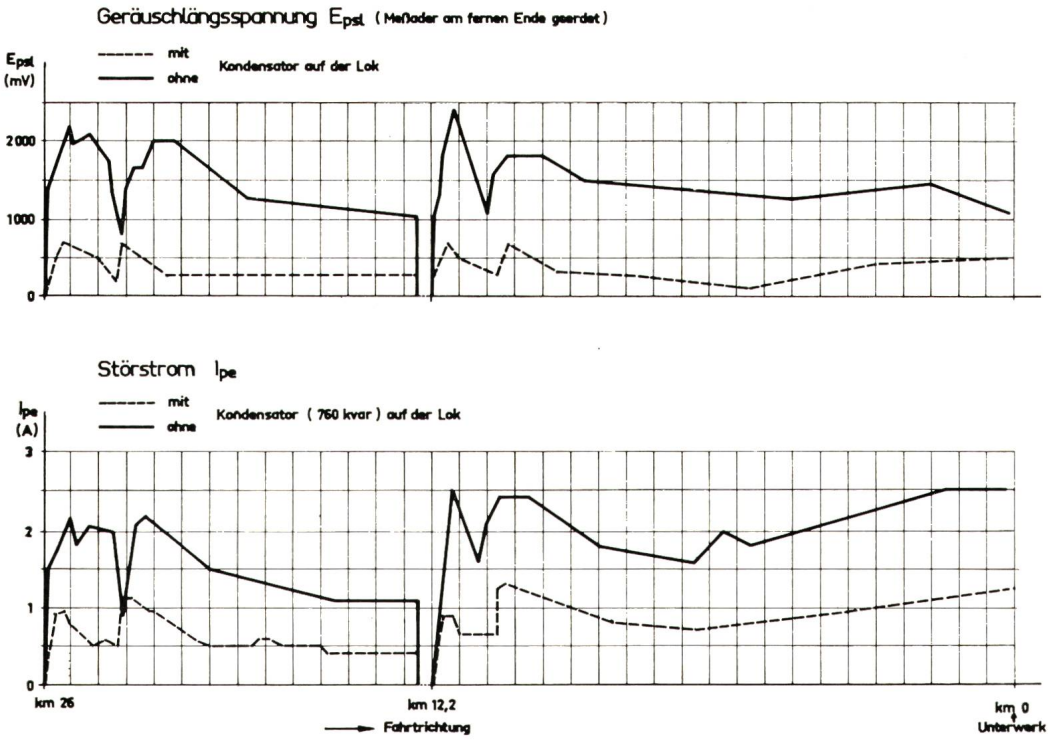


Fig. 12
Verlauf von Störstrom und Geräuschlängsspannung bei Fahrt einer Thyristorlokomotive
(3200 kW, 16⅔ Hz)
Einfluss von Kondensatoren auf der Lokomotive

ecke gekennzeichnet sind, die Maximalwerte bei Kondensatorbeschaltung an). Aus dem Verlauf des Störstromes, der besonders ein Mass für die höheren Harmonischen ist, ist eine durchschnittliche Verminderung um den Faktor 3 zu entnehmen (Fig. 12). Die Störwirkung auf Fernsprechanlagen lässt sich also trotz des grossen Aufwandes mit einer Gesamtkapazität von rund 18 000 μF (= etwa 750 kvar) nicht vollständig und in vielen Fällen wohl auch nicht ausreichend beseitigen.

Eine weitere Verminderung der Störwirkung um etwa 30 % wurde beobachtet, wenn gleichzeitig 2 mit Kondensatoren beschaltete Lokomotiven im selben Speiseabschnitt fuhren. Durch *RC*-Glieder (R = 100Ω, *C* = 2 μF) im Unterwerk werden Resonanzschwingungen des Fahrleitungsnetzes, die vom steilen Stromanstieg der Anschnittsteuerung angeregt werden, gedämpft, wie schon frühere Versuche mit gittergesteuerten Quecksilberdampfgleichrichtern gezeigt hatten (Fig. 13).

Der Saugtransformator gehört ebenfalls zu den Massnahmen auf der Starkstromseite zur Verringerung der Beeinflussung durch Oberschwingungen und Störströme. In seiner heute fast ausschliesslich verwendeten Schaltung mit eigener Rückleitung wäre nach den Direktiven des CCITT (Ausgabe 1960) für jeden Abschnitt zwischen 2 Saugtransformatoren, der nicht von einer Lokomotive besetzt ist, ein frequenzunabhängiger Reduktionsfaktor von 0,025 einzusetzen. Für den besetzten Abschnitt gilt der übliche Schienenstrom-Reduktionsfaktor von 0,5. Da der Abstand zweier Transformatoren zwischen etwa 2,5 und 5 km liegt, würde bei starkem Verkehr mit rascher Zugfolge (z. B. im S-Bahn-Betrieb) die Reduktionswirkung weitgehend aufgehoben werden, weil jeder Abschnitt besetzt ist. Ob auch Resonanzerscheinungen hier eine Rolle spielen, soll noch untersucht werden.

Die Zusammensetzung der Oberschwingungen mehrerer im selben Abschnitt fahrender thyristorgesteuerter Fahrzeuge scheint nach den bisherigen Ermittlungen nach geometrischen Gesetzen vor sich zu gehen. Verhältnismässig einfach konnte dies für die Störströme nachgewiesen werden, indem gleichzeitig der Störstrom jedes einzelnen Fahrzeuges und deren Summe im Unterwerk gemessen wurde. Dabei wurde darauf geachtet, dass der von dem Unterwerk allein gespeiste Streckenabschnitt kurz war, um die Erscheinungen der Wellenausbreitung vernachlässigen zu können. Zu untersuchen bleibt noch, ob sich der Störstrom bei synchroner Steuerung mehrerer gekuppelter Triebwagen von dem Summenwert bei unabhängiger Fahrt jedes Triebwagens unterscheidet.

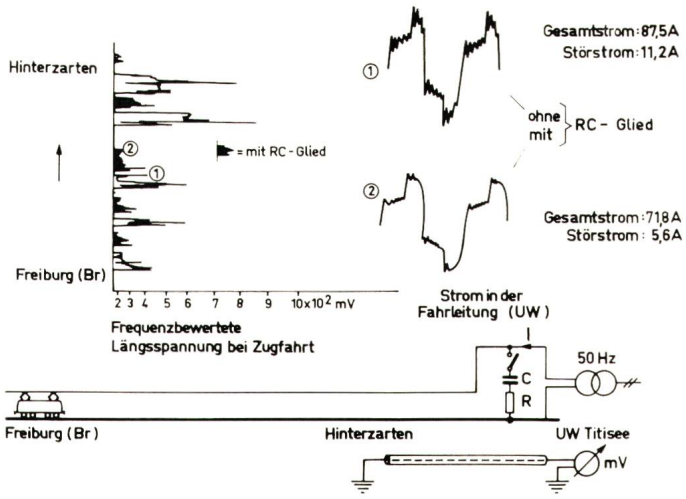


Fig. 13
Dämpfung von Resonanzschwingungen durch *RC*-Glied

4. Gleichstrombahnen

An Gleichstrombahnen gibt es 3 Möglichkeiten der Thyristorsteuerung: Die Impulsbreiten-, die Impulsfrequenzsteuerung und die Wechselrichtung mit anschliessender Anschnittsteuerung. Mit Ausnahme vom Wechselrichterbetrieb stehen noch keine Messergebnisse von Gleichstromfahrzeugen mit Leistungen zur Verfügung, die mit Wechselstromfahrzeugen zu vergleichen wären.

In allen Fällen wird eine Beurteilung der Störwirkung auf Fernmelde- und Signalanlagen dadurch erschwert, dass Gleichstrombahnen über Stromrichter gespeist werden, die selbst kräftige «Harmonische» im Gleichstrom erzeugen. Diese sind — abhängig von der Pulszahl der Stromrichter — ganze Vielfache der Frequenz des speisenden Drehstromnetzes. Allgemein überwiegen sechspulsige Stromrichter oder Schaltungen, die diesem Betrieb entsprechen; bei 50-Hz-Netzspannung entstehen dann im Gleichstromnetz Schwingungen von 300, 600, 900 Hz usw. Saugkreise zur Dämpfung dieser Oberschwingungen werden kaum verwendet. Die Amplituden der Schwingungen sind dann ungefähr so gross, wie die von den thyristorgesteuerten Fahrzeugen verursachten.

Die Impulsbreitensteuerung hat im Gleichstrom im wesentlichen nur Frequenzen zur Folge, die der Steuerfrequenz entsprechen. Ihre Amplituden werden verringert, wenn bei mehrmotorigen Fahrzeugen eine phasenversetzte Aussteuerung angewandt wird, wobei sich die Grundfrequenz erhöht. Hinsichtlich der Störwirkung auf Fernsprechleitungen wird damit aber nichts erreicht; denn das Störgewicht von z. B. 400 Hz ist 5,5mal grösser als das von 200 Hz, so dass trotz der Verminderung der Amplituden auf etwa ¼ die Störung noch grösser ist also ohne Phasenversetzung.

In der Wahl der Steuerfrequenz besteht keine vollkommene Freiheit; denn diese darf nicht mit der Resonanzfrequenz zusammenfallen, die sich aus der Reihenschaltung des Speicherkondensators mit der vorgeschalteten Induktivität ergibt, sie muss ausreichenden Abstand haben. Durch Vergrössern des Speicherkondensators können die Amplituden der Oberschwingungen zwar gedämpft werden, doch wird damit für Frequenzen unterhalb der Resonanzfrequenz auch die Eingangsimpedanz herabgesetzt, die unter Umständen wegen der Beeinflussung von Gleisstromkreisen nicht kleiner als die der klassischen Triebfahrzeuge sein soll.

Die Impulsfrequenzsteuerung erzeugt Frequenzen über den gesamten Steuerbereich. Dies kann bedeuten, dass Gleisstromkreise nicht in diesem Frequenzbereich arbeiten dürfen. Für Fernsprechleitungen wird die Gesamtbeeinflussung wesentlich grösser werden als bei den anderen Steuerarten. Praktische Erfahrungen mit der Auswirkung der Impulsfrequenzsteuerung sind noch nicht bekannt geworden.

Die Steuerfrequenz eines Wechselrichters erscheint mit doppelter Frequenz im Fahrleitungsstrom. Durch eine phasenversetzte Aussteuerung wird erreicht, dass der Fahrleitungsstrom mit der vierfachen Steuerfrequenz und verminderter Amplitude pulsiert, wobei die doppelte Steuerfrequenz verschwindet. Letzteres gilt allerdings nur unter der Voraussetzung, dass beide Wechselrichter symmetrisch belastet werden.

Der praktische Betrieb mit einer Wechselrichterlokomotive hat gezeigt, dass die symmetrische Belastung der Wechselrichter nicht unbedingt zutreffen muss. Hierfür kann es

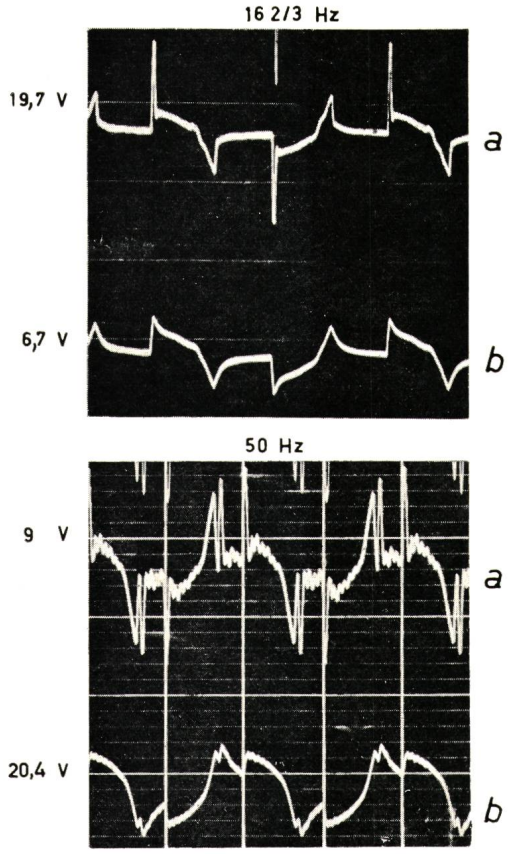


Fig. 14
Induzierte Spitzenspannungen in einer ungeschirmten Leitung (*a*) und in der Leitung eines Bleimantelkabels (*b*)

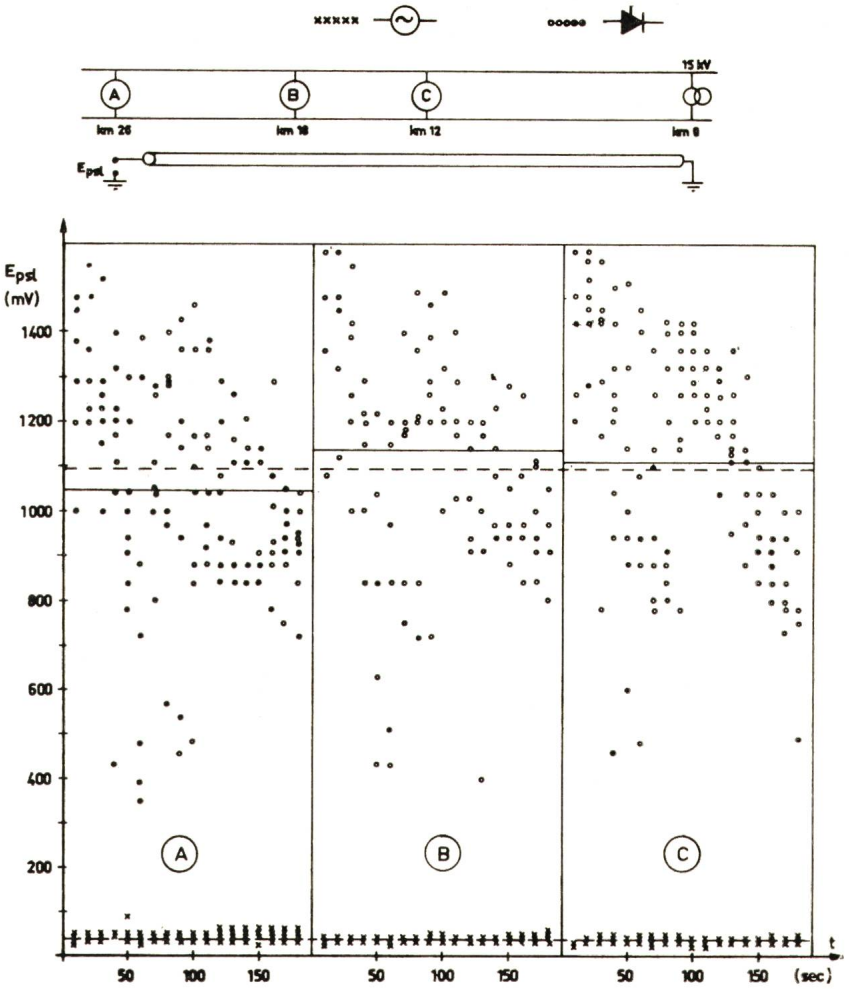
mehrere Gründe geben. Bereits im Stillstand einer Lokomotive können kleinere Unsymmetrien dann vorhanden sein, wenn die Hilfsbetriebe nur an einem Wechselrichter angeschlossen sind. Im Fahrbetrieb entstehen Ungleichheiten, wenn die beiden Fahrmotorstromrichter voneinander unabhängige, nicht synchronisierte Stromregler haben. Schliesslich kann es vorkommen, dass statische Wechselrichter Unterschiede in den positiven und negativen Halbwellen aufweisen, wenn die Flussregler nicht genau abgeglichen sind.

Der Störstrom, also die Störwirkung der frequenzbewerteten Harmonischen auf Fernsprechleitungen, wird, selbst wenn die oben genannten Symmetriebedingungen nicht voll eingehalten sind, ungefähr ebenso gross sein wie der einer anschnittgesteuerten Wechselstromlokomotive gleicher Leistung für 50 Hz.

Auf Gleisstromkreise können sich Wechselrichter-Unsymmetrien nachteilig auswirken. An einer 1500-V-Gleichstrombahn wurden Schwebungen zwischen der doppelten Steuerfrequenz von etwa 224 Hz einer nicht gut symmetrierten Wechselrichterlokomotive und der 300-Hz-Schwingung der ortsfesten Gleichrichter beobachtet, wodurch eine Beeinflussung der dort vorhandenen 75 Hz-Gleisstromkreise nicht auszuschliessen ist.

Für die Zusammensetzung der Frequenzen einzelner Fahrzeuge mit unterschiedlicher Steuerfrequenz gelten grundsätzlich die gleichen Überlegungen wie bei Wechselstrombahnen, jedoch mit der Einschränkung, dass für Steuerfrequenzen mit nur wenigen Hertz Unterschied eine arithmetische Addition angebracht sein dürfte. Bis zu welchem

Fig. 15
Geräuschlängsspannung E_{psl} in einem Fernmeldekabel bei Anfahrten einer Thyristorlokomotive
3200 kW, 16⅔ Hz
(Vergleiche mit einer Einphasenlokomotive)



Frequenzunterschied dies richtig ist, muss die Praxis erweisen.

5. Auswirkungen auf Fernmelde- und Signalanlagen

Durch den steilen Stromanstieg der Anschnittsteuerung bei Wechselstrombahnen werden in benachbarten Fernmelde- und Signalleitungen, die keinen metallenen Schirm haben, hohe Spitzenspannungen induziert, die bei Parallelführungen von mehreren Kilometern Länge die für Berührungsspannungen zulässige Grenze von 65 $\sqrt{2}$ V überschreiten können. Als Beispiel hierfür zeigt Fig. 14 die in einer 615 m langen ungeschirmten Leitung (*a*) induzierten Spannungen im Vergleich mit den Spannungen in einer gleichlangen Leitung eines Bleimantelkabels (*b*) bei 16⅔ und 50 Hz.

Die Dauer dieser Spannungsspitzen ist sehr kurz, sie liegt unter 1 ms. Die Spitzen treten jedoch in jeder Halbwelle auf, also mit der doppelten Frequenz der Grundschwingung. Für die Isolationsbeanspruchung der Leitungen und angeschlossenen Geräte dürften diese Spannungen ohne Bedeutung sein, weil die Scheitelwerte der durch Kurzschlußströme induzierten Spannungen kaum erreicht werden.

Aus der Steilheit und Höhe dieser Spitzenspannungen lässt sich möglicherweise besser auf Vorgänge und Unregelmässigkeiten in der Anschnittsteuerung schliessen, als wenn der induzierende Fahrleitungsstrom allein oszillographiert würde.

5.1 Fernmeldeanlagen

Die nachstehenden Betrachtungen über die Schwierigkeiten bei der Berechnung und Messung von Geräuschspannungen gelten im grundsätzlichen gleichermassen für Wechselstrom- und Gleichstrombahnen. Unterschiede bestehen jedoch — abgesehen vom Frequenzspektrum — vor allem in der Länge der Speiseabschnitte, die unterschiedliche Übertragungs- und Ausbreitungsbedingungen zur Folge haben können.

Die in Fernsprechleitungen induzierten Geräuschspannungen sind nach den klassischen Formeln, die in den Direktiven des CCITT und in den nationalen Vorschriften enthalten sind, im wesentlichen der Frequenz des induzierenden Stromes, seiner Amplitude und der Länge der Parallelführung proportional. Alle bisherigen Messungen an Wechselstrombahnen haben immer wieder ergeben, dass bei den in der Stromrichtertechnik in Frage kommenden Frequenzen die Bedingung der Proportionalität zur Länge der Parallelführung meistens nicht zutrifft. Dies zeigt z. B. deutlich das Messergebnis der Geräuschlängsspannung bei Anfahrten einer Thyristorlokomotive an 3 verschiedenen Stellen einer 26 km langen Strecke, längs der ein Fernmeldekabel geführt ist (Fig. 15). Offenbar schwingt die ganze Fahrleitung für mehrere Frequenzen.

Die Mittelwerte (1100 mV) der stark streuenden Geräuschspannungen nach Fig. 15 sind unabhängig davon, ob die Lokomotive in 12, 18 oder 26 km Abstand vom Unterwerk anfuhr. Ebenfalls fast unabhängig von der Strecken- und Parallelführungslänge erweist sich der in Fig. 12 oben wiedergegebene Verlauf der Geräuschlängsspannung. Dazu kommt, dass die an dem einen oder anderen Ende gemessenen Geräuschspannungen verschieden gross sind; Unterschiede bis zu 50 % wurden schon festgestellt.

Die im Fernsprecher hörbare Geräusche-EMK ergibt sich bekanntlich aus der Multiplikation der Geräuschlängsspannung mit dem Empfindlichkeitsfaktor der Leitung, der von Ort und Lage der Leitung im Kabel sowie von der Frequenz abhängt, also eine statistische Grösse ist.

Ein weiterer Unsicherheitsfaktor für jede Vorausberechnung ist die frequenzabhängige Bodenleitfähigkeit, die vor allem in bebautem Gelände kaum definierbar ist. Glücklicherweise nimmt sie in solchem Gelände mit wachsendem Abstand sehr rasch ab, so dass vor allem in Stadtgebieten nicht

mit Geräuschstörungen zu rechnen ist, solange nur die Leitungsunsymmetrie zu berücksichtigen ist.

Grösser als die Unsymmetrie der Leitungen ist gewöhnlich die der Amtsschaltungen mit Erdbeziehung. Damit sind alle Ortsverbindungsleitungen des öffentlichen Fernsprechdienstes beschaltet, die mit Gleichstrom arbeiten. Für solche Anlagen können Schutzmassnahmen notwendig werden, wenn sie im unmittelbaren Einflussbereich einer Bahnstrecke liegen, auf der thyristorgesteuerte Triebfahrzeuge eingesetzt werden.

Ist auf solchen Fernmeldeleitungen und -systemen eine Datenübertragung beabsichtigt, so darf nicht allein mit den effektiven Geräuschspannungswerten gerechnet werden, es sind hier vielmehr auch die kurzzeitigen Spannungsspitzen zu berücksichtigen.

Die symmetrisch arbeitende Übertragung im trägerfrequenten Bereich wird nach den bisherigen Beobachtungen selbst in stark beeinflussten Bahnfernmeldekabeln nicht störend beeinflusst.

Rundfunk, Betriebszugfunk oder Fernsehen werden durch die Thyristor-Anschnittsteuerung nicht nennenswert gestört. Die hochfrequenten Störschwingungen werden offenbar durch die den Thyristoren parallel geschalteten *RC*-Glieder zur Spannungsstabilisierung und Unterdrückung von Kommutierungsschwingungen ausreichend gedämpft.

Vergleichende Messungen der Funkstörspannung bei Anfahrt einer Thyristor- und Einphasenlokomotive zeigten, dass lediglich bei kleiner Geschwindigkeit das typische Prasseln einer Thyristorstörung zu vernehmen ist, das aber bei zunehmender Geschwindigkeit von den üblichen Stromabnehmer-Kontaktstörungen überdeckt wird (Fig. 16). Mehr als die Leistungssteuerung der Fahrmotoren stören unter Umständen thyristorgesteuerte Wechselrichter für die Hilfsbetriebe, besonders in Langwellenbereich.

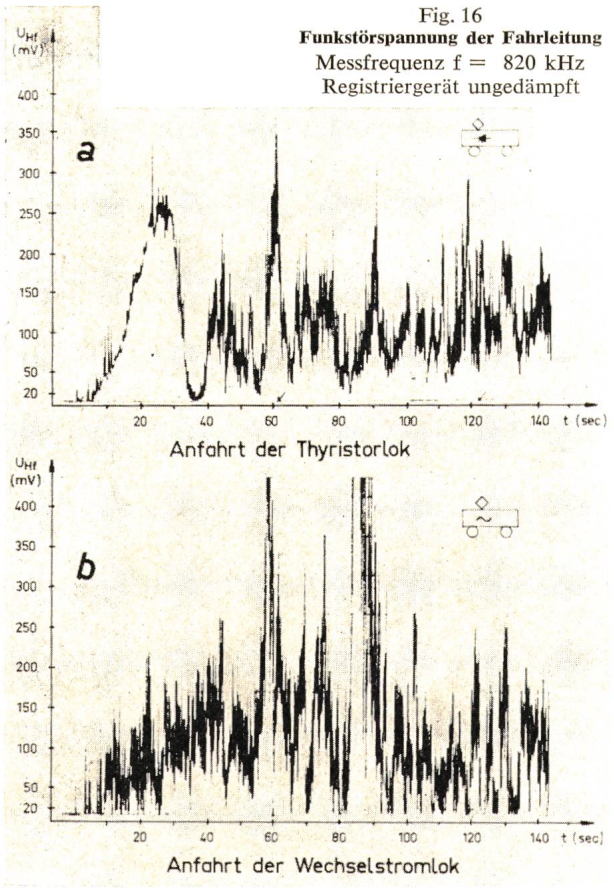


Fig. 16
Funkstörspannung der Fahrleitung
Messfrequenz f = 820 kHz
Registriergerät ungedämpft

5.2 Signalanlagen

Die neuesten Untersuchungen an 100-Hz-Gleisstromkreisen auf Wechselstrombahnen haben ergeben, dass diese Anlagen auch an Strecken, die von leistungsstarken thyristorgesteuerten Triebfahrzeugen befahren werden sollen, weiter betrieben werden können, wenn:

a) durch Symmetrierung der elektronischen Steuerung ein Minimum der geradzahligen Harmonischen zu erreichen ist bei einem Zündwinkelunterschied von nicht wesentlich mehr als 1°;

b) bei einer Störung der Brückensymmetrie, z. B. bei Ausfall eines Brückenzweiges, die Weiterfahrt des Triebfahrzeugs unterbunden wird;

c) keine Kondensatoren am Brückeneingang des Triebfahrzeuges (zur Verbesserung des Leistungsfaktors und zur Dämpfung der höheren Harmonischen) verwendet werden.

Gleichzeitig müssen aber auch an den Gleisstromkreisen einige Massnahmen gegen den Einfluss der Grundschwingung des Fahrstromes getroffen werden, die aber mit der Thyristorsteuerung selbst nichts zu tun haben, sondern nur durch hohe Fahrströme bedingt sind.

Tonfrequenzgleisstromkreise mit Betriebsfrequenzen zwischen etwa 1000 und 3000 Hz haben sich verschiedentlich als störanfällig erwiesen, es sei denn, dass ein Phasendiskriminator verwendet wird. Gleisstromkreise mit einer Betriebsfrequenz um 10 kHz werden nicht gestört.

Achszähler: Eine Veränderung der Impulsform unter dem Einfluss der Anschnittsteuerung wurde bisher weder bei magnetischen Impulsgebern noch bei elektronischen Doppelimpulsgebern festgestellt.

Über die Beeinflussung des Linienleiterbetriebes, der im Frequenzbereich von 20 bis 100 kHz arbeitet, lassen sich noch keine sicheren Aussagen machen. Störungen sind denkbar durch hochfrequente Schwingungen, die im Fahr- oder Rückstrom enthalten sind, durch hochfrequente Spitzenspannungen, die in dem ungeschirmten Leiter induziert werden, wie auch durch direkte hochfrequente Strahlung von stromdurchflossenen Bauteilen und Leitungen im Brücken- oder Motorkreis auf die Empfänger- und Senderspulen.

6. Schlussbetrachtungen

Die bisherigen Untersuchungen lassen die wesentlichen Ursachen erkennen, die bei der Thyristorsteuerung für die Beeinflussung von Fernmelde- und Signalanlagen von Bedeutung sind, sie reichen aber für eine endgültige Beurteilung noch nicht aus. Da eine wirkungsvolle Entstörung auf der Starkstromseite nicht möglich ist, wird die Thyristorsteuerung, sollte sie sich weiterhin ausbreiten, dazu beitragen, dass die Erdsymmetrie aller Schaltungen der Nachrichtentechnik nachhaltig verbessert wird.

Adresse des Autors:
R. Buckel, Bundesbahndirektor, Dezernent 71 des Bundesbahn-Zentralamtes, D–8000 München.