Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke

Band: 62 (1971)

Heft: 1

Artikel: Was erwarten die Bahnen von der Anwendung von Thyristoren auf ihren Triebfahrzeugen?

Autor: Meyer, E.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-915784

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: 07.08.2025

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

BULLETIN

DES SCHWEIZERISCHEN ELEKTROTECHNISCHEN VEREINS

Gemeinsames Publikationsorgan des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins (SEV)
und des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätswerke (VSE)

Diskussionstagung des SEV

über

Leistungs-Thyristoren auf elektrischen Triebfahrzeugen [1])

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,

von *E. Meyer,* Bern

621.314.632.049:621.335

1. Einführung

Bekanntlich sind heute die Bahnen entweder mit Gleichstrom oder einphasigem Wechselstrom elektrifiziert, wenn man von den mit Ausnahme von einigen Sonderfällen im Verschwinden begriffenen Drehstrombahnen absieht. Der Umstand, dass es bis vor etwa 20 Jahren nicht gelungen war, einen bahntauglichen Fahrmotor für die allgemein üblichen Wechselstrom-Frequenzen zu bauen, hatte seinerzeit zur Wahl einer besonderen niedrigen Bahnfrequenz von 16⅔ oder 25 Hz geführt. Die damit verbundenen Auflagen mannigfacher Natur liessen immer wieder, und besonders imperativ am Ende des letzten Weltkrieges, den Wunsch aufkommen, die weiteren Bahnelektrifikationen mit dem weltweit vereinheitlichten Wechselstrom von 50 Hz durchführen zu können. Bei dieser Gelegenheit hatten die Bemühungen neben der Schaffung eines bahntauglichen einphasigen Kollektormotors für 50 Hz auch die Anwendung von Gleichrichtern auf elektrischen Triebfahrzeugen zum Ziel. Dank der inzwischen eingetretenen stürmischen Entwicklung der Stromrichtertechnik werden heute elektrische Triebfahrzeuge für 50 Hz sozusagen ausnahmslos nur noch als Stromrichter-Triebfahrzeuge gebaut. Anderseits hat der Stromrichter auf Triebfahrzeugen für 16⅔ Hz bis heute erst in vereinzelten, besonders gelagerten Fällen Fuss fassen können. Es ist jedoch zu erwarten, dass der *Thyristor* als steuerbarer Stromrichter inskünftig auf Wechselstrom-Triebfahrzeugen für 50 wie für 16⅔ und 25 Hz rasch und in grossem Umfang Einzug halten wird, weil er ausser zur Gleichrichtung des Wechselstromes auch zur Steuerung des Triebfahrzeuges und noch für die Erfüllung zahlreicher weiterer Funktionen dienen kann. Unterdessen haben sich ihm selbst auf Gleichstrom- und auf dieselelektrischen Triebfahrzeugen zahlreiche Anwendungsgebiete erschlossen. Die fast trägheitslos regelbaren Thyristoren erfüllen, wie alle elektronischen Schaltelemente, am besten die Voraussetzungen für die Einführung von automatischen Zugkraft- und Geschwindigkeitsregelungen auf Triebfahrzeugen aller Art und bereiten den Weg vor zu einer vollautomatischen Zugführung.

2. Anwendungsmöglichkeiten von Thyristoren auf Eisenbahn-Triebfahrzeugen

2.1 Allgemeines

Dem Gebrauch von Thyristoren auf elektrischen Triebfahrzeugen ging die Anwendung von andersgearteten Stromrichtern voraus. Zunächst hatten ungesteuerte und später auch gesteuerte Lichtbogen-Stromrichter als Ignitrons oder Exitrons auf zahlreichen mit 50 Hz gespeisten und auf Mehrstrom-Triebfahrzeugen Eingang gefunden. Dabei wurde der anfänglich sehr grosse, in der Folge allerdings stark abgebaute Aufwand für die Kühlung und Heizung der Gefässe

[1]) Dieses Heft enthält die an der Tagung gehaltenen Referate. Die Diskussionsbeiträge werden in Heft 3 erscheinen.

und die zahlreichen Schutzeinrichtungen gegen Rückzündungen und andere Fehlermöglichkeiten als nachteilig empfunden. Die Entwicklung von leistungsfähigen und gegenüber Temperatureinflüssen weniger empfindlichen Halbleiterdioden kam daher den im Hinblick auf den Betrieb und Unterhalt mit Nachdruck vorgebrachten Wünschen sehr entgegen. In neuester Zeit führte nun ein weiterer Schritt in dieser ausserordentlich raschen und heute zweifellos noch keineswegs abgeschlossenen Entwicklung zum serienreifen und auch den strengen Anforderungen des Bahnbetriebs gewachsenen steuerbaren Halbleiter-Stromrichter, dem Thyristor. Dabei zeigte sich sehr bald, dass die Anwendungsmöglichkeiten von Thyristoren über diejenigen der einfachen Halbleiterdioden weit hinausgehen.

Beschränkt man sich auf die Betrachtung der Leistungsthyristoren, so sind für diese, in Mittelpunkt- oder Brückenschaltung, allein oder zusammen mit anderen elektronischen Bauelementen, auf Eisenbahn-Triebfahrzeugen etwa die in den folgenden Abschnitten aufgezeigten Einsatzmöglichkeiten erkennbar:

a) Gesteuerter Gleichrichter zur Umwandlung des aus der Fahrleitung bezogenen Wechselstromes in einen für die Speisung der Fahrmotoren geeigneten Wellenstrom (Mischstrom) und zur Variation des Spannungswertes in den Fahrmotor-Stromkreisen zum Zwecke der Steuerung oder Regelung des Triebfahrzeuges;

b) Selbstgeführter oder netzgeführter Wechselrichter zur Umwandlung von Gleichstrom in ein- oder mehrphasigen Wechselstrom konstanter oder variabler Spannung und Frequenz;

c) Statischer Phasenumrichter und Frequenzwandler zur Umwandlung von einphasigem in mehrphasigen oder von mehrphasigen in einphasigen Wechselstrom konstanter oder variabler Spannung und Frequenz;

d) Kontaktloser Schalter mit oder ohne Steuerfunktion, insbesondere zur Steuerung von mit Gleichstrom gespeisten Fahrmotoren (Gleichstrom-Umrichter).

Thyristoren können in den Fahrmotor-Stromkreis beim Fahren und elektrischen Bremsen, in den Stromkreisen der Hilfsbetriebe und in den Steuer- und Regelungs-Stromkreisen von elektrischen und dieselelektrischen Triebfahrzeugen verwendet werden. Ihre Funktion hängt dabei von ihrem Einsatz, von der Art des Triebfahrzeugs und von der Stromart, mit welcher dieses gespeist wird, ab. Es ist daher angezeigt, in dieser Hinsicht die Wechselstrom-, die Gleichstrom-, die Mehrstrom- und schliesslich auch die dieselelektrischen Triebfahrzeuge gesondert zu betrachten.

2.2 Thyristoren auf Wechselstrom-Triebfahrzeugen

Bei neueren Triebfahrzeugen, die mit Einphasen-Wechselstrom von 50 Hz gespeist werden, ist die Umwandlung des aus der Fahrleitung bezogenen 50-Hz-Wechselstromes in einen mehr oder weniger gewellten Gleichstrom zur Regel geworden, um der Verwendung der schweren und empfindlichen 50-Hz-Wechselstrommotoren aus dem Weg zu gehen.

Bei Speisung mit 16⅔ und 25 Hz wird dieser Weg erst ausnahmsweise beschritten, weil es heute möglich ist, Wechselstrommotoren für niedrige Frequenz mit einem nur geringen Mehraufwand an Raum und Gewicht ebenso robust, betriebssicher und wartungsarm zu bauen wie Gleich- oder Wellenstrommotoren. Das kann jedoch nicht daran hindern, unter bestimmten besonderen Umständen auch Wechselstrom-Triebfahrzeuge für niedrige Frequenzen als Stromrichter-Triebfahrzeuge auszuführen. Als solche Sonderfälle haben sich erwiesen:

a) Grenzleistungslokomotiven mit hoher Zugkraft, wo eine maximale Ausnützung der Haftreibung von Bedeutung ist;

b) Lokomotiven, die auf grossen Steigungen mit grossen Anhängelasten häufig anzufahren haben;

c) Triebfahrzeuge, insbesondere Triebwagen, wo wegen der wünschbaren niedrigen Fussbodenhöhe für den Einbau von genügend leistungsstarken Fahrmotoren nur wenig Platz zur Verfügung steht;

d) Triebwagen, bei denen die vom pulsierenden Drehmoment der Wechselstrommotoren verursachten Vibrationen aus Komfortgründen zu vermeiden sind.

Wo auf solchen Fahrzeugen eine Umwandlung des einphasigen Wechselstromes in einen Wellenstrom als zweckmässig erachtet wird, haben sich zur Erfüllung dieser Aufgabe zunächst ungesteuerte Halbleiterdioden bestens bewährt. Dabei müssen allerdings der Stufentransformator und die Einrichtung für die Variation der Spannung in den Fahrmotorstromkreisen beibehalten werden. Der Übergang von den Dioden zu den Thyristoren gestattet es nun, diese nicht nur für die Gleichrichtung des Stromes, sondern auch für Steuerungs- und Regelungszwecke zu benützen und die frühere abgestufte «Amplitudensteuerung» durch eine stufenlose «Anschnittsteuerung» zu ersetzen. Man verspricht sich davon eine weitere Verbesserung des Adhäsionsverhaltens, eine Vereinfachung des nun mit einem festen Übersetzungsverhältnis zu bauenden Transformators, den Wegfall der umfangreichen Starkstromapparatur und des damit verbundenen Aufwandes für die Wartung und den Ersatz der Kontakteinrichtungen und ihrer Betätigungsorgane. Damit gewinnt der Thyristor auch für Wechselstrom-Triebfahrzeuge für niedrige Frequenzen an Interesse, so dass grosse Aussicht besteht, dass Thyristorsteuerungen inskünftig auf Wechselstrom-Triebfahrzeugen aller Arten in zunehmendem Masse eingeführt werden.

Bei Verwendung von Dioden kann eine elektrische Bremse nur als Widerstandsbremse ausgelegt werden. Bereits hier können aber Thyristoren für die Steuerung oder Regelung der Erregung der als Generatoren arbeitenden Fahrmotoren mit grossem Vorteil Verwendung finden. Sie sind dabei die wichtigsten Bestandteile von gesteuerten Gleichrichtern oder Wechselrichtern mit nachgeschalteten ungesteuerten Gleichrichtern. Abgesehen von der wenig sinnvollen Vernichtung der anfallenden Bremsenergie stellt bei grossen Bremsleistungen die Abfuhr der entstehenden Wärmemenge oft nur schwer lösbare Platz-, Gewichts- und Lüftungsprobleme. Hier kann nun der Ersatz der Dioden durch Thyristoren in den Leistungsstromkreisen eine günstige Lösung bringen, indem er den Übergang zur elektrischen Nutzstrombremse ermöglicht. Bei dieser wird die frei werdende Bremsenergie über die zu diesem Zweck als Wechselrichter geschalteten Thyristoren auf rationellste Art und nahezu verlustlos in die Fahrleitung zurückgespeist. Dabei ist der zusätzliche Aufwand für diese Art der Nutzbremsung verschwindend gering, während er bei den konventionellen Wechselstrom-Rekuperationsschaltungen immer noch ins Gewicht fällt, obwohl es im Laufe der Zeit gelungen ist, ihn erheblich zu senken.

Auch in den Hilfsbetriebs-Stromkreisen der Wechselstrom-Triebfahrzeuge haben sich Halbleiterdioden bereits in grosser Zahl eingeführt, damit auch die Hilfsmotoren als Wellenstrommotoren gebaut werden können. Hier ist es denkbar, Thyristoren an ihre Stelle treten zu lassen, die bei-

spielsweise für die Drehzahlregelung von Ventilatoren dienen können. Bereits stark verbreitet sind Thyristoren für die Gleichrichtung und Regelung des Ladestroms der Batterien in Funktion ihres Ladezustandes.

Wo motorische Hilfsbetriebe einen grossen Umfang annehmen, wird es u. U. zweckmässig sein, ein Drehstromnetz für die Hilfsbetriebe vorzusehen. Dieses kann dann durch einen Thyristor-Umrichter über eine Anzapfung des Transformators und einen Gleichstrom-Zwischenkreis aus dem einphasigen Fahrleitungsnetz versorgt werden.

Wird für Steuerungs- und Regelungszwecke eine stabilisierte Wechselspannung mit einer vorgegebenen Frequenz verlangt, kann diese in gleicher Weise über einen besonderen Thyristor-Umrichter erzeugt werden. Zur zentralen Speisung der Fluoreszenzbeleuchtung von Triebwagen aus der Batterie ist die Verwendung eines Thyristor-Wechselrichters naheliegend.

2.3 Thyristoren auf Gleichstrom-Triebfahrzeugen

Die bisher übliche Steuerung von Gleichstrom-Triebfahrzeugen krankte von jeher an zwei nachteiligen Gegebenheiten, der starren Gebundenheit der Fahrmotorspannung an die Fahrleitungsspannung und der fehlenden Möglichkeit, die Spannung in den Fahrmotor-Stromkreisen auf einfache Weise und verlustlos zu variieren. Dabei zwingen die zunehmenden Triebfahrzeugleistungen zur Anwendung einer möglichst hohen Fahrdrahtspannung von 1500 oder 3000 V, während die für die Bemessung der Fahrmotoren günstigste Spannung etwa zwischen 500 und 1000 V liegt. Das erfordert die ständige Reihenschaltung von zwei oder mehr Motoren, was zu einer unerwünschten Verschlechterung des Adhäsionsverhaltens des Triebfahrzeuges beiträgt. Die Variation der Klemmenspannung der Fahrmotoren kann ebenfalls nur durch verschiedene Gruppierung mehrerer Fahrmotoren und durch schrittweise Überbrückung von Widerständen erzielt werden. Abgesehen von den dabei entstehenden Energieverlusten hat dieses wenig elegante Steuerverfahren ebenfalls ein schlechtes Adhäsionsverhalten des Triebfahrzeugs zur Folge.

Hier erschliesst nun der Thyristor in seiner Funktion als schneller und fast trägheitsloser, kontakt- und verschleissfreier Schalter ganz neue Möglichkeiten. Er erlaubt als «Gleichstromsteller» mit der Puls- oder Choppersteuerung eine stufenlose Veränderung der Gleichspannung in den Fahrmotoren-Stromkreisen zwischen Null und der vollen Fahrleitungsspannung und macht damit die Vorschaltwiderstände samt ihrer Schaltapparatur und die in ihnen entstehenden Energieverluste entbehrlich. Werden die Fahrmotoren dabei aus einer mitgeführten Energiequelle, z. B. einer Akkumulatorenbatterie gespeist, bietet dieses Verfahren keinerlei Schwierigkeiten. Bei Triebfahrzeugen mit Energiezufuhr von aussen macht die Induktivität der Fahrleitung dagegen die Vorschaltung eines Energiespeichers notwendig. Es muss dabei versucht werden, den bei hohen Leistungen erheblichen zusätzlichen Aufwand an Raum und Gewicht durch geeignete Wahl der Pulsfrequenzen und Schaltfolgen auf ein tragbares Mass zu verringern.

Die starre Bindung der maximalen Klemmenspannung der Fahrmotoren an die Spannung der Energiequelle bleibt in beiden Fällen bestehen. Soll auch diese dahinfallen, so bleibt der Weg offen, einen zweckmässigerweise dreiphasigen Thyristor-Wechselrichter und einen Transformator mit einem auf die günstigste Fahrmotorenspannung abgestimmten Übersetzungsverhältnis hintereinander und eine Thyristor-Anschnittsteuerung nachzuschalten. Auf diese Weise erhalten die ständig parallel geschalteten Fahrmotoren eine stufenlos und verlustfrei veränderbare wellige Gleichspannung, die von der Grösse der Fahrleitungsspannung unabhängig ist. Beide Verfahren sind geeignet, das Adhäsionsverhalten der Gleichstrom-Triebfahrzeuge entscheidend zu verbessern.

Die Pulssteuerung bietet ohne wesentliche zusätzliche Einrichtungen die Möglichkeit, die beim elektrischen Bremsen anfallende elektrische Energie in die Stromquelle bzw. in die Fahrleitung zurückzuspeisen, was bei Akkumulator-Fahrzeugen im Verein mit der verlustlosen Steuerung eine willkommene Vergrösserung des Aktionsbereichs mit sich bringt. Aber auch auf Gleichstrom-Triebfahrzeugen mit konventioneller Steuerung und elektrischer Widerstands- oder Nutzstrombremse haben sich Thyristoren als geeignetes Hilfsmittel erwiesen. Die meistens bevorzugte Fremderregung der als Generatoren arbeitenden Reihenschlussmotoren verlangt hohe Erregerströme bei geringen Spannungen, die auf einem aus dem Fahrdraht gespeisten Gleichstrom-Triebfahrzeug in der Regel nicht verfügbar sind. Auch hier kann dieser Erregerstrom über einen Thyristor-Wechselrichter, einen Transformator und eine nachgeschaltete Anschnittsteuerung der Fahrleitung entnommen und stufenlos verändert werden. Die früher dafür üblichen rotierenden Umformer werden somit durch statische Bauelemente ersetzt.

Auf ganz ähnliche Weise können aus der Fahrleitung einzelne Hilfsbetriebsmotoren mit einer geeigneten Spannung gespeist und die Fahrzeugbatterie aufgeladen werden. Wenn indessen zahlreiche Hilfsmotoren vorhanden sind, ist es bisweilen auch hier einfacher, diese an ein Drehstrom-Bordnetz anzuschliessen und dieses seinerseits über einen dreiphasigen Thyristor-Wechselrichter aus der Fahrleitung zu versorgen.

2.4 Thyristoren auf Mehrstrom-Triebfahrzeugen

Der Bau von Mehrstrom-Triebfahrzeugen, d. h. Triebfahrzeugen, die sowohl mit Gleichstrom verschiedener Fahrdrahtspannung als auch mit Wechselstrom verschiedener Spannung und Frequenz betrieben werden können, ist durch die Entwicklung der Stromrichter ganz allgemein und der Thyristoren im besonderen stark erleichtert worden. Die Fahrmotoren solcher Triebfahrzeuge werden meistens als Wellenstrommotoren ausgelegt, die im Wechselstrombetrieb über Transformator, Stufenschalter und Dioden oder über eine Thyristor-Anschnittsteuerung mit Wellenstrom und bei Gleichstrombetrieb mit Gleichstrom gespeist werden. Dieses bis jetzt am meisten verbreitete Verfahren hat den Nachteil, dass die Fahrmotorspannung an die Spannungen der Gleichstrom-Fahrleitung gebunden ist, und dass zwei Steuereinrichtungen, die eine für Gleich- und die andere für Wechselstrom, vorhanden sein müssen, es sei denn, die unschöne und unwirtschaftliche Steuerung mit Vorschaltwiderständen werde nicht nur bei Gleich- sondern auch bei Wechselstrom angewendet. Diese Nachteile werden vermieden, wenn die Fahrmotoren auf Wechsel- und Gleichstromnetzen gleicher-

massen über einen Transformator und eine Thyristor-Anschnittsteuerung mit Wellenstrom unter einer für die Motoren geeigneten und stufenlos veränderbaren Spannung versorgt werden. Dazu ist im Gleichstrombetrieb der Fahrleitungsstrom vorgängig über einen Thyristor-Wechselrichter in einphasigen Wechselstrom umzuwandeln.

Sollen Mehrstrom-Triebfahrzeuge mit einer elektrischen Bremse ausgerüstet werden, so wird der Einfachheit halber dafür meistens eine Gleichstrom-Widerstandsbremse gewählt. Die Bremserregung wird dabei zweckmässig über eine Thyristor-Anschnittsteuerung aus einem Transformator gespeist, der im Wechselstrombetrieb direkt und im Gleichstrombetrieb über einen Thyristor-Wechselrichter an die Fahrleitung angeschlossen wird. Der gleiche Transformator kann auch für die Speisung der Hilfsbetriebe über eine Dioden- oder Thyristorenbrücke dienen, wenn dafür nicht ein Drehstrom-Bordnetz vorgezogen wird. Dieses könnte alsdann im Gleichstrombetrieb über einen dreiphasigen Thyristor-Wechselrichter und im Wechselstrombetrieb über einen Thyristor-Phasenumrichter und Frequenzwandler mit der Fahrleitung in Verbindung stehen. Bisher hat man es allerdings vorgezogen, diesen Drehstrom durch rotierende Umformergruppen zu erzeugen und den damit verbundenen Wartungsaufwand in Kauf zu nehmen.

2.5 Thyristoren auf dieselelektrischen Triebfahrzeugen

Die Fortschritte der Stromrichtertechnik haben auch die Gestaltung der elektrischen Leistungsübertragung von Dieseltriebfahrzeugen beeinflusst. Für die vom Dieselmotor angetriebenen Generatoren, welche früher ausnahmslos als Gleichstrommaschinen gebaut wurden, werden immer häufiger Drehstrom-Synchronmaschinen verwendet, deren Strom über Halbleiter-Dioden gleichgerichtet und den nach wie vor als Gleichstrom-Reihenschlussmaschinen ausgelegten Fahrmotoren zugeleitet wird. Auch als Erreger werden neuerdings Drehstrommaschinen vorgezogen. Zur Variation des Erregerstroms des Generators oder des Erregers selbst wird eine Thyristor-Anschnittsteuerung als geeignet erachtet.

Die Notwendigkeit, inskünftig die Züge auch bei Dieselzugförderung elektrisch zu heizen, verlangt auf den Diesellokomotiven einen Heizgenerator, wofür mit Vorteil ebenfalls eine Drehstrommaschine gewählt wird. Bei Heizung der Züge mit Gleichstrom dient eine dreiphasige Halbleiter-Diodenbrücke zur Umwandlung des Drehstroms in Gleichstrom. Erfordern die Heizstromkreise dagegen einen einphasigen Wechselstrom mit einer vorbestimmten konstanten Spannung und Frequenz, so sorgt ein aus Thyristoren aufgebauter statischer Phasenumrichter, der auch die Funktionen eines Frequenzwandlers erfüllt, für die Umformung des Heizgeneratorstromes.

2.6 Thyristoren als Wegbereiter des kollektorlosen Fahrmotors

Die Fahrmotoren von Gleichstrom-, Einphasenwechselstrom- und dieselelektrischen Triebfahrzeugen sind heute ausnahmslos Kollektormaschinen. Der viel einfachere und kollektorlose Drehstrom-Asynchronmotor mit Kurzschlussläufer ist für die Zugförderung nur dann geeignet, wenn er mit Drehstrom variabler Frequenz gespeist werden kann. Die in einzelnen Fällen versuchte Umformung des der Fahrleitung entnommenen Gleich- oder Einphasen-Wechselstroms in einen Drehstrom mit einstellbarer Frequenz mit Hilfe von rotierenden Umformergruppen hat einen in jeder Hinsicht untragbaren Aufwand zur Folge gehabt. Die Entwicklung leistungsfähiger Thyristoren kam daher gerade zur rechten Zeit, um auch dieses Problem einer besseren Lösung entgegenzuführen. Selbstgeführte und zwangskommutierte Thyristor-Wechselrichter sind ohne weiteres in der Lage, einen der Fahrleitung entnommenen Gleichstrom in einen Drehstrom variabler Frequenz umzuformen. Um einiges aufwendiger wird diese Umformung, wenn der Fahrdraht einphasigen Wechselstrom führt, da dieser vorgängig mit Hilfe einer Diodenbrücke in Gleichstrom umgewandelt werden muss. Ein gleicher Zwischenkreis-Umrichter ist auch auf dieselelektrischen Triebfahrzeugen nicht zu umgehen, wenn diese von kollektorlosen Motoren angetrieben werden sollen und in ihren Generatoren Drehstrom erzeugt wird. Damit hat der Thyristor den kollektorlosen Fahrmotor auf elektrischen und dieselelektrischen Triebfahrzeugen aller Art seiner Verwirklichung einen bedeutenden Schritt näher gebracht. Die Vorteile eines solchen Motors liegen in seiner Einfachheit und Anspruchslosigkeit, in seinen kleineren Abmessungen und in einem geringeren Gewicht und Preis. Diese Einsparungen werden indessen immer noch mehr als wettgemacht durch den zusätzlichen Aufwand für die statischen Gleich- und Wechselrichter mit ihrem umfangreichen Zubehör, so dass ein Gewichts- und erst recht ein Preisvergleich noch sehr zu ungunsten des kollektorlosen Motors ausfällt. Nur vom technischen Standpunkt aus betrachtet, würde seiner Anwendung indessen nichts entgegenstehen.

2.7 Thyristoren als Schalter

Mehr und mehr werden Thyristoren auch dort eingesetzt, wo sie nichts anderes als reine Schaltfunktionen zu erfüllen haben. Damit treten kontakt- und verschleissfreie elektronische Bauelemente an die Stelle von stark belasteten und häufig schaltenden konventionellen Schaltern, deren mechanische Kontakteinrichtungen einem grossen Verschleiss unterworfen sind. Als charakteristisches Beispiel sei dafür der Einsatz von Thyristoren in Antiparallelschaltung bei den herkömmlichen Stufenschaltern auf Wechselstrom-Triebfahrzeugen angeführt. Sie dienen zur Entlastung der bisherigen Lastschalter und machen einen Überschaltwiderstand entbehrlich, weil sich der Übergang von einer Stufe zur andern beim Stromnulldurchgang vollzieht. Bei Gleichstrom-Triebfahrzeugen findet man Thyristoren an Stelle bisheriger mechanischer Schaltorgane für die Veränderung von Anfahr-, Brems- und Shuntwiderständen, wobei die Vergrösserung oder Verringerung des Widerstandes mit Hilfe einer Pulssteuerung zudem stufenlos gestaltet werden kann.

3. Vor- und Nachteile der Verwendung von Thyristoren

Im Kapitel 2 sind die heutigen Möglichkeiten der Anwendung von Thyristoren auf Eisenbahn-Triebfahrzeugen aufgezählt worden. Offen bleibt dabei die Frage, wie weit von diesen Möglichkeiten tatsächlich Gebrauch gemacht wird. Zweifellos ist das jedesmal nur dann der Fall, wenn die Vorteile dieser Anwendung voraussichtlich grösser sind als deren Nachteile. Diese Vor- und Nachteile gilt es in je-

dem Einzelfall sorgfältig gegeneinander abzuwägen, bevor Entscheide getroffen werden. Gleichzeitig werden auch Überlegungen wirtschaftlicher Natur anzustellen sein, denn die Anwendung einer neuen Technik ist ja nur dann sinnvoll, wenn diese in jeder Hinsicht nicht nur einen vermeintlichen sondern einen wirklichen Fortschritt erwarten lässt. Was die Bahnen von jeder neuen Technik heute erwarten, ist kurz gefasst etwa das Folgende:

a) Vereinfachung der elektrischen Ausrüstungen und Schaltungen; Abbau der Zahl der Bauelemente, besonders auch der Hilfsbetriebe und der Schutz- und Überwachungseinrichtungen.

b) Verminderung der Abmessungen, des Gewichtes und des Preises aller Einzelteile, besonders der im Drehgestell eingebauten Fahrmotoren, zur Erzielung einer weiteren Leistungssteigerung der Triebfahrzeuge.

c) Verminderung des Arbeits- und Kostenaufwandes für Betrieb, Unterhalt und Erneuerung aller Bestandteile der Triebfahrzeuge durch Anwendung von verschleissfreien oder mindestens verschleissarmen und wartungsfreien Bauelementen und von leicht und rasch ein- und ausbaubaren Tauschteilen. Das gilt insbesondere auch für die Fahrmotoren.

d) Verbesserung oder mindestens Aufrechterhaltung des gegenwärtigen Standes bezüglich Betriebssicherheit und Störungsanfälligkeit der Triebfahrzeuge.

e) Verbesserung des Adhäsionsverhaltens, d. h. Erreichung einer noch besseren Ausnützung der Haftreibung, u. a. durch Anwendung von stufenlosen Steuerungen und Regelungen.

f) Möglichkeit der Rückspeisung der Bremsenergie in das Fahrleitungsnetz ohne nennenswerten Mehraufwand.

g) Möglichkeit einer weiteren Automatisierung der Zugführung durch Anwendung von möglichst trägheitslosen Schaltelementen, die nur kleine Steuerströme erfordern.

h) Verbesserung des Fahrkomforts durch Anwendung von lärm- und vibrationsfreien Bauelementen.

Durchgeht man diesen anspruchsvollen Katalog der Wünsche und Forderungen, so wird man erkennen, dass auch die verschiedenen Thyristorschaltungen diese noch nicht oder erst teilweise zu erfüllen vermögen. So bringt beispielsweise der Ersatz eines der Abnützung unterworfenen Bauelementes durch ein verschleissfreies keinen Gewinn, wenn dieses dafür gegenüber Überspannungen, Überströmen, Wärme, Kälte, Feuchtigkeit oder Verschmutzung empfindlicher ist und zudem noch zahlreichere Schutz- und Überwachungseinrichtungen erfordert. Im Triebfahrzeugbau hat auch die alte Technik einen beachtlichen Stand erreicht, was u. a. in einer geringen Störungsanfälligkeit zum Ausdruck kommt. Die Bahnen werden daher nicht bereit sein, eine neue Technik anzuwenden, die eine Vergrösserung der Störungsanfälligkeit mit sich bringt. Schliesslich sollte die Anwendung neuartiger Bauelemente auch nicht mit höheren Investitionskosten erkauft werden müssen. Der technische Fortschritt beinhaltet im Gegenteil auch eine Verbilligung in Anschaffung, Betrieb und Unterhalt.

4. Rückwirkungen der Anwendung von Thyristoren auf das speisende Netz und die ortsfesten Anlagen

Bei jeder Stromentnahme aus einem Bahnstromnetz sind darin gewisse Rückwirkungen verschiedener Natur festzustellen. Es ist zu erwarten, dass diese grösser sind und u. U. zu Störungen Anlass geben können, wenn es sich beim Stromverbraucher um ein Thyristor-Triebfahrzeug handelt. Zunächst ist voraussehbar, dass der Blindenergieverbrauch eines Thyristor-Triebfahrzeugs grösser sein wird als derjenige eines Gleichrichter-Triebfahrzeuges mit ungesteuerten Dioden, welches seinerseits wieder mehr Blindenergie benötigt als ein von Wechselstrom-Fahrmotoren angetriebenes Fahrzeug. Um die durch den höheren Blindstrombedarf verursachten Energieverluste in den Kraft- und Unterwerken und in den Fahr- und Übertragsleitungen nicht allzu stark anwachsen zu lassen, muss schon auf den Triebfahrzeugen selbst versucht werden, den Blindstromverbrauch durch schaltungstechnische Massnahmen nach Möglichkeit herabzusetzen. Gelegentlich sind darin auch schon Kondensatorbatterien aufgestellt worden, die zur Blindstromlieferung herangezogen werden. Zum mindesten wird aber in den Unterwerken in geeigneter Weise für eine vermehrte Blindstromerzeugung gesorgt werden müssen.

Ein noch schwieriger zu lösendes Problem bringt der Umstand, dass der Oberwellengehalt des Primärstromes bei Thyristor-Triebfahrzeugen besonders gross ist. Diese Oberwellen machen sich im ganzen speisenden Netz bis zu den Generatoren im Kraftwerk in nachteiliger Weise bemerkbar. Noch folgenschwerer sind diese Rückwirkungen in den benachbarten Signal-, Sicherungs- und Fernmeldeanlagen. Mit Gleisstromkreisen arbeitende Sicherungsanlagen, die dazu Wechselstrom verwenden, sind solchen Beeinflussungen besonders ausgesetzt und störempfindlich. Während solche Anlagen vornehmlich durch die unteren Harmonischen des Primärstroms gestört werden, sind es die oberen Harmonischen, welche die Störwirkungen und die Störgeräusche in den Fernmeldeanlagen hervorrufen. Vorkehren zur Verminderung der Störempfindlichkeit dieser Anlagen sind in einem gewissen Masse möglich, aber sehr kostspielig. Im übrigen ist auch aus anderen Gründen kaum daran zu denken, alle störungsgefährdeten Anlagen in absehbarer Zeit so umzubauen, dass sie solchen Störeinflüssen gegenüber unempfindlich werden. Schon aus diesem Grunde ist dafür zu sorgen, dass in erster Linie die Störungsursachen beseitigt und die Thyristor-Triebfahrzeuge, als Störungsverursacher, so gebaut werden, dass der Störpegel die Empfindlichkeitsgrenze der bestehenden Anlagen nicht überschreitet. Zu diesem Zwecke können bei Thyristor-Triebfahrzeugen für Gleichstrom u. a. die Puls- und allfällige Wechselstromfrequenzen so gewählt werden, dass sie und ihre höheren Harmonischen in genügendem Abstand zur Frequenz der Gleisstromkreise liegen. Bei solchen für Wechselstrom sind die Frequenzen der Oberwellen durch die Grundfrequenz des Fahrleitungsstromes vorbestimmt, so dass in diesem Fall nötigenfalls eher an eine Verlagerung der Frequenz der Gleisstromkreise gedacht werden muss. Im übrigen ist auch hier anzustreben, das gesteckte Ziel vor allem durch schaltungstechnische Massnahmen auf dem Fahrzeug zu erreichen, weil für den Einbau von besonderen Entstörungseinrichtungen, wie Filter- und Kondensatorbatterien, dort in der Regel weder genügend Platz noch freies Gewicht zur Verfügung steht.

Es ist nicht zu verkennen, dass die ganze Entwicklung und der Einsatz von Thyristor-Triebfahrzeugen aufgehalten oder mindestens stark verzögert wird, wenn es nicht gelingt, für das Problem der verschiedenen Störbeeinflussungen bald eine technisch befriedigende und praktisch realisierbare Lösung zu finden.

Adresse des Autors:
Prof. Dr. sc. techn. *E. Meyer*, Chef des Zugförderungs- und Werkstättedienstes, Generaldirektion der SBB, 3000 Bern.