Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke

Band: 62 (1971)

Heft: 1

Artikel: Der Traktionsmotor bei Speisung über Stromrichter und Gleichstromteller

Autor: Moser, R.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-915786

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: 08.08.2025

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

Der Traktionsmotor bei Speisung über Stromrichter und Gleichstromsteller

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

von *R. Moser*, Zürich-Oerlikon

621.314.632.049:621.335

1. Einleitung

In den vergangenen zwei Jahrzehnten sind eine grosse Zahl von Arbeiten publiziert worden, die sich mit allen möglichen Aspekten des Traktionsmotors bei Speisung über Gleichrichter, später Stromrichter und neuerdings auch Gleichstromsteller befassen. Eine Grosszahl von Triebfahrzeugen verschiedenster Ausführung stehen seit Jahren im erfolgreichen Einsatz und gestatten es, mannigfache Betriebsergebnisse im Zusammenhang mit ihrer Starkstromelektronik zu sammeln.

Das steuerbare Gleichrichter-Element, der Thyristor, bringt neue Möglichkeiten. Mit den vorliegenden Ausführungen soll versucht werden, einen Überblick über die für den Traktionsmotor resultierenden Konsequenzen zu geben.

Unter Traktionsmotor sollen im weitesten Sinn alle heute gebräuchlichen oder in naher Zukunft anzutreffenden Typen verstanden werden:

a) Kollektormotoren für Gleich-, Misch- und Einphasenstrom;
b) Drehfeldmotoren (Synchron- und Asynchronmotoren), Wanderfeldmotoren.

Alle Motortypen werden seit Anfang der Elektrifikation um die Jahrhundertwende für Traktionszwecke verwendet. Der Kollektormotor hat allereings eine ungleich grössere Verbreitung gefunden. Asynchronmotoren kamen hauptsächlich in Verbindung mit Drehstrom-Speisung fester Frequenz zur Anwendung, z. B. früher auf der Simplonlinie, auf gewissen norditalienischen Linien, sowie heute bei Bergbahnen, z. B. bei der Gornergratbahn und der Jungfraubahn.

Während bis ca. 1950 die Fahrdrahtspeisung entweder mit Gleichstrom oder mit Wechselstrom 16⅔ Hz erfolgte, kam in den Nachkriegsjahren, bei Neuelektrifikationen, die 50-Hz-Speisung des Fahrdrahtes direkt aus dem Netz der Allgemeinversorgung zum Durchbruch. Zur Speisung der Traktionsmotoren ergaben sich 3 Alternativen:

a) Direkt mit 50 Hz Einphasen-Wechselstrom;
b) Über Stromrichter;
c) Über rotierende Umformer.

Die verschiedenen Lösungen, die speziell auf den Strecken der SNCF zur Ausführung kamen, wurden an der Tagung in Lille 1955 eingehend vorgestellt. Auf dem Netz der SBB kamen 1957 Zweifrequenz-Rangierlokomotiven mit Stromrichtern zum Einsatz.

Die ersten Betriebserfahrungen mit Gleichrichterfahrzeugen zeigten sofort die grossen Vorteile dieser Traktionsart bei 50-Hz-Speisung, wenn auch die verwendeten Quecksilberdampf-Gefässe eine gewisse Komplikation bedeuteten. Durch das Erscheinen der Silizium-Diode Ende der 50er Jahre wurde dem Traktions-Gleichrichter schlagartig ein fast unbegrenztes Anwendungsgebiet eröffnet, auch wenn vorläufig auf die Steuerbarkeit verzichtet werden musste. Die Schweizerischen Bundesbahnen konnten zum Beispiel 1961 mit dem damaligen Stand der Technik die bekannten 4-Strom-TEE-Züge [4][1]) in Betrieb setzen, die es erstmals ermöglichten, einen Grossteil der europäischen elektrifizierten Strecken mit der gleichen Maschine zu befahren.

Das Erscheinen des Leistungs-Thyristors in der 2. Hälfte der 60er Jahre hat nun vollends alle Möglichkeiten zur Speisung von Traktionsmotoren eröffnet.

2. Übersicht der verschiedenen Anwendungen von Thyristoren zur Speisung von Fahrmotoren

Die Vielzahl der Motortypen, die im Zusammenhang mit Thyristoren zu betrachten sind, werden zunächst in vier Hauptgruppen unterteilt.

2.1 Einphasen-Wechselstrom beliebiger Frequenz; Kollektormotoren mit Speisung über Stromrichter

Diese am häufigsten anzutreffende Lösung erlaubt zusammen mit Gemischt- oder Fremderregung der Fahrmotoren praktisch jede gewünschte Fahrzeug-Charakteristik zu realisieren. Durch den Wechselrichterbetrieb ist die Nutzstrombremsung möglich, wobei spezielle Anforderungen an den Triebmotor gestellt werden. Bezüglich Motor sind zwei Hauptschaltungen zu unterscheiden (Fig. 1):

a) Mischstromschaltung:
Der Motor wird über eine Glättungsdrosselspule D gespeist und erhält eine fast vollständig geglättete Klemmenspannung, jedoch einen mehr oder weniger oberwellenhaltigen Strom. Die Stromoberwellen werden mit einem Ohmschen Dauershunt R_{sh} vom Feldkreis ferngehalten.
b) Mischspannungs-Schaltung:
Der serieerregte Motor wird direkt vom Stromrichter gespeist. An den Klemmen erhält er sowohl oberwellenhaltige Spannung als auch oberwellenhaltigen Strom. Feld und Wendepolwicklung werden durch einen gemeinsamen Ohmschen Widerstand R_c überbrückt.

Die Schaltung a) stellt geringere Anforderungen bezüglich Oberwellen an den Motor, so dass für kleinere Leistungen sogar normale Gleichstrommotoren verwendet werden können. Der Hauptfluss weist praktisch keine Welligkeit auf.

Die Schaltung b) bedingt wegen der notwendigen Flusswelligkeit Motoren mit lamelliertem Stator [4]. Über die Eigenarten der Schaltungen wurde bereits an anderer Stelle eingehend berichtet [1; 2; 4; 5; 8; 9].

Ein durch den Motor nur wenig beeinflussbares wichtiges Problem stellen die Stromoberwellen im Fahrdraht dar, die Störmöglichkeiten von Signal- und Fernmeldeanlagen ergeben können.

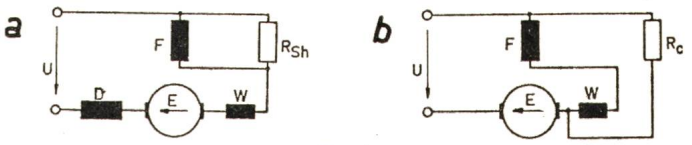


Fig. 1
Motorschaltungen
a Mischstrom-Schaltung; *b* Mischspannungs-Schaltung; *D* Glättungsdrosselspule; *E* induzierte Ankerspannung; *F* Feldwicklung; R_c kombinierter Shunt; R_{Sh} Ohmscher Dauershunt; *U* Klemmenspannung am Gleichrichter bzw. Stromrichter; *W* Wendepolwicklung

[1]) Siehe Literatur am Schluss des Aufsatzes.

2.2 Gleichstrom-Kollektormotoren mit Speisung über Gleichstromsteller

Die konventionelle Regelung der Fahrmotoren durch Vorschaltwiderstände wird durch eine Pulssteuerung ersetzt. Sie erlaubt eine praktisch verlustlose, stufenlose Spannungsregelung des Traktionsmotors, wobei gleichzeitig eine günstige Zugkraftcharakteristik resultiert.

Als Motor kommen je nach Schaltungsart Typen wie unter Abschnitt 2.1a) oder b) zur Anwendung.

Nicht durch Motroprobleme bedingt, wohl aber durch den recht grossen Aufwand in der Leistungselektronik, sind die Anwendungen des Gleichstromstellers noch beschränkt. Auch hier müssen Beeinflussungsmöglichkeiten durch Stromoberwellen im Fahrdraht beachtet werden [14].

2.3 Kollektormotoren mit Unterstützung der Kommutation durch Thyristoren

In 3 Publikationen [7; 16; 17] berichtet Prof. *Bates* über die Idee und die Erfahrungen mit seinen speziell entwickelten Maschinen. Das Prinzip: «Der Schaltvorgang unter der Kohlebürste» wird auf Thyristoren verlagert, so dass der Kontakt Kohle–Kupfersegment ausschliesslich der Stromübertragung dient und keine Schaltfunktion hat. Da in einem solchen Fall sowohl die induzierte Spannung als auch die Reaktanzspannung zwischen zwei Kollektorlamellen wesentlich höher sein dürfen, kann die Lamellenzahl stark reduziert werden. Durch kleinere Kollektordurchmesser werden rascherlaufende Maschinen möglich. Prototypmaschinen von 200 kW Leistung befinden sich im Versuchsbetrieb.

2.4 Kollektorlose Motoren mit Speisung durch Umrichter mittels variabler Frequenz und variabler Spannung

Das Konzept, für die Zugförderung den mit variabler Frequenz gespeisten Drehfeldmotor, im speziellen den Asynchronmotor, zu verwenden, wurde schon 1902 patentiert. Die in der Folge spärliche Anwendung ist auf den grossen Aufwand in dem zur Speisung benötigten Maschinenumformer zurückzuführen. Eine modernere Ausführung wurde 1955 in der Form von Spezial-Güterzuglokomotiven von 3000 kW Leistung für die Strecke Valenciennes–Thionville der SNCF realisiert [3]. Die von 2 Maschinen-Umformergruppen gelieferte 3-Phasen-Spannung variiert in der Frequenz zwischen ca. 4 und 135 Hz, in ihrer Grösse im wesentlichen proportional der Frequenz. Trotz des ausgezeichneten Fahrverhaltens blieb die Ausführung dieses Lokomotivtyps wegen des grossen Aufwandes der Maschinenumformer auf eine kleine Serie beschränkt. Fig. 2 zeigt den dort verwendeten 500-kW-Käfigläufer-Traktionsmotor, dessen einfache Bauart auch äusserlich auffällt. Ähnliche Motoren werden nun wieder für die Verwendung bei Umrichterspeisung aktuell.

Der Thyristor erlaubt die Realisierung statischer Phasen- und Frequenzumformer, wobei im Vergleich zum Maschinenumformer ein wesentlich geringeres Gewicht resultiert. Damit zeichnet sich für den Drehfeldmotor ein weit grösseres zukünftiges Anwendungsgebiet ab, als dies bisher der Fall war. Der kostenmässige Aufwand an Starkstromelektronik ist indessen heute noch beträchtlich.

Für die Schweizerischen Bundesbahnen ist eine Umrichterausrüstung für einen Gepäcktriebwagen im Bau. Über den dort verwendeten Asynchronmotor mit Käfigläufer wurde bereits an anderer Stelle berichtet [11].

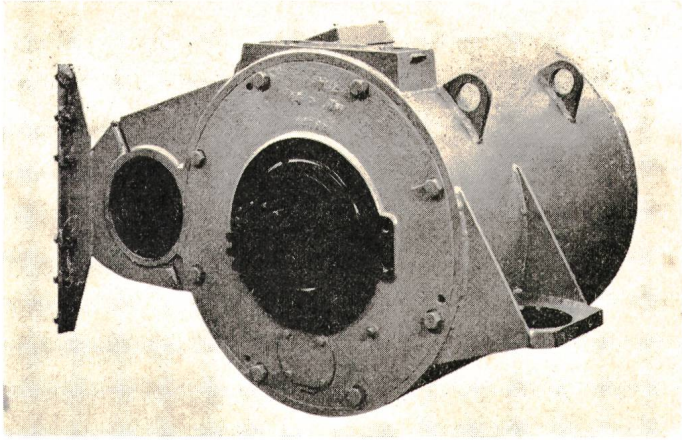


Fig. 2
Traktions-Asynchronmotor $P = 500$ kW

Von einer Speisung mit variabler Frequenz wird auch der zukünftige Linearmotor profitieren, dessen physikalisches Funktionsprinzip weitgehend dem eines Drehfeldmotors entspricht.

3. Kollektormotoren oder Motoren ohne Kollektor in der Zukunft?

In der Traktionstechnik haben sich gewisse Erfindungen oder Neuerungen oft schlagartig und umfassend durchgesetzt, wie z. B. vor rund 12 Jahren die Siliziumdiode. Sind ähnlich rasche und umfassende Folgen vom Thyristor zu erwarten, so z. B. das baldige Verschwinden des Kollektormotors?

Wie in Abschnitt 2 gezeigt, wird der Thyristor bereits bei 4 Hauptgruppen von Motoren angewendet. 3 Gruppen umfassen indessen Kollektormotoren, wovon wiederum die erste — 50-Hz-Traktion — die bisher grösste Ausdehnung aufweist. Es ist wenig wahrscheinlich, dass sich diese Diversifikation in kurzer Zeit auf eine einzige Lösung, z. B. Umrichter mit Asynchronmotoren, konzentrieren wird.

Der Kollektor stellt wohl für Fabrikation und Unterhalt ein anspruchsvolles Bauelement dar. Seiner Elimination stehen aber erhebliche Mehraufwendungen im Starkstrom-Elektronikteil gegenüber. Der Asynchronmotor wiederum ist wohl einfacher als der Kollektormotor, weist aber dennoch zu wartende oder der Alterung unterworfene Teile auf.

Für den Betriebsfachmann zählt der Gesamtaufwand für den Betrieb eines Fahrzeuges in bezug auf seine Leistungsfähigkeit in geförderten Brutto-Tonnen-km. Der Aufwand setzt sich bekanntlich aus Kapitalkosten, Abschreibung und Unterhalt zusammen. Der Entscheid, welche Lösung in einem definierten Anwendungsfall die günstigste ist oder welche die in Zukunft am meisten verwendete sein wird, hängt von vielen, von Fall zu Fall verschiedenen Parametern ab.

Die aufgeworfene Frage ist also dahin zu beantworten, dass für die nächsten Jahre im Zusammenhang mit Thyristorspeisung Motoren mit und ohne Kollektor weiterhin zur Anwendung kommen werden.

4. Konsequenzen der Thyristor-Technik in bezug auf die Traktionsmöglichkeiten und auf den Traktionsmotor

Leistungsfähigkeit und Traktionsverhalten eines Triebfahrzeuges werden weitgehend durch dessen Zugkraft-Geschwinkeitscharakteristik beschrieben. Dieses «Arbeitsfeld» des

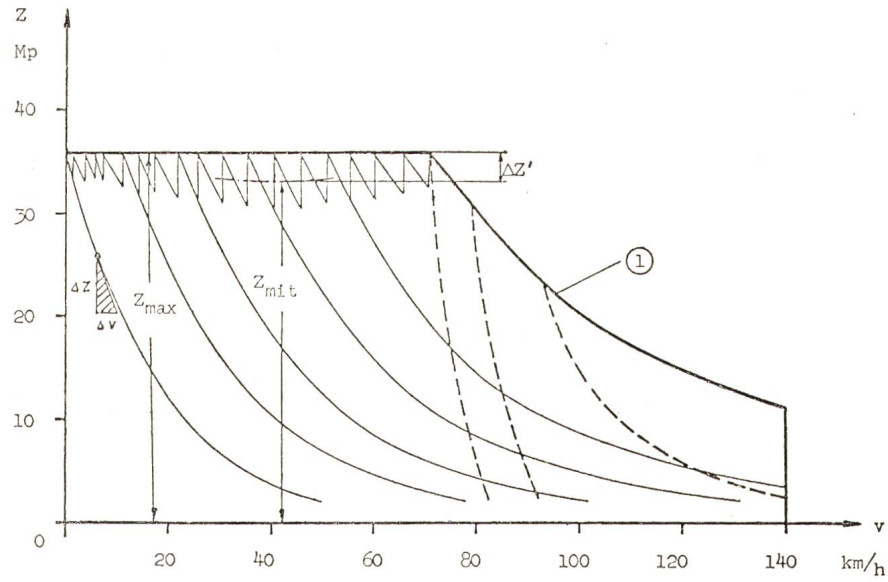


Fig. 3
Z-V-Charakteristik eines Gleichrichterfahrzeuges
① möglicher Zugkraftverlauf bei Thyristorspeisung; Z Zugkraft; v Geschwindigkeit; $\Delta Z'$ Zugkraft-Gewinn bei Thyristorspeisung; Z_{max} maximale Zugkraft (Spitze); Z_{mit} mittlere Zugkraft

Triebfahrzeuges zeigt die bei verschiedenen Geschwindigkeiten ausübbaren Zugkräfte, ihre Abstufung und die Steilheit der ohne Regeleingriff sich ergebenden Kurven $Z = f(V)$, die bekanntlich für die Ausnützung der Adhäsion Rad–Schiene wichtig ist. Die Möglichkeiten der Thyristortechnik kommen im gleichen Diagramm zum Ausdruck, sei es durch den Wegfall der einzelnen definierten Stufen oder durch Charakteristiken beliebiger Lage und Form, wie sie sich durch die Anwendung der Regeltechnik zur Steuerung der Thyristoren erzeugen lassen. Für den Motor resultieren daraus häufig erhöhte Belastungsanforderungen. Die Anschnittsteuerung der Thyristoren ergibt ferner einen erhöhten Oberwellenanteil in Spannung und Strom, so dass bei der Auslegung des Traktionsmotors gewisse Rücksichten zu nehmen sind.

Die einzelnen Gesichtspunkte sollen in den folgenden Abschnitten diskutiert werden.

4.1 Kollektormotoren mit Speisung über Stromrichter aus dem Einphasen-Wechselstromnetz

4.1.1 Die Möglichkeiten

Fig. 3 zeigt die bekannte Z-V-Charakteristik eines Gleichrichterfahrzeuges mit Serie-Motoren und Stufenschalter-Steuerung. Günstig für das Adhäsionsverhalten ist die steile Form der Kurven im Bereich grosser Zugkräfte, d. h. der grosse Wert $\Delta Z/\Delta V$. Je grösser der Wert, umso rascher wird bei einem beginnenden Schleudervorgang der Radsatz wieder aufgefangen, ohne dass eine externe Regelung der Motorspeisung nötig wäre.

Werden die Motoren mit Fremd- oder einer Gemischterregung ausgerüstet (gestrichelte Kurven), so lässt sich der Wert $\Delta Z/\Delta V$ vor allem bei kleinen Zugkräften weiter erhöhen.

Soweit die grundsätzlichen, bekannten Vorteile der Gleichrichtertraktion. Als ein Mangel müssen die Stufensprünge empfunden werden, die sowohl beim Aufschalten der Zugkraft im Stillstand bis zum Losbrechen des Zuges als auch beim weiteren Beschelunigen merkbar sind. Mit genügend hoher Stufenzahl und allenfalls durch die Dämpfungswirkung der Glättungsdrosselspule konnten bisher annehmbare Verhältnisse erzielt werden.

Die Thyristortechnik bringt folgende neue Möglichkeiten:

a) Stufenlose Zugkraftregelung;
b) Differenzierte Zugkräfte für einzelne Achsen oder Drehgestelle;
c) Beliebige Regulierkurven innerhalb des Z-V-Diagramms.

Kurve 1 in Fig. 3 zeigt einen möglichen Zugkraftverlauf bei Thyristorsteuerung. Jegliche Stufung entfällt. Grundsätzlich kann die dem Maximalstrom des Motors entsprechende Zugkraft lückenlos ausgenützt werden. Da keine Zugkraftstösse mehr vorhanden sind, kann adhäsionstechnisch die Zugkraft besser ausgenützt werden. Dies wird durch den Gewinn $\Delta Z'$ angezeigt, der sich aus dem Vergleich von Z_{mittel}, das bei gestufter Schaltung für die Anfahrt wirksam ist, mit Z_{max} ergibt. Grundsätzlich lassen sich innerhalb des von der Traktionsausrüstung gegebenen Z-V-Feldes beliebige Formen und Lagen von Regulierkurven erreichen (Fig. 4). Zum Beispiel:

V = konstant, wählbar bei vorgegebener Beschleunigung bzw. Anfahrzugkraft. Fig. 4 illustriert dies mit Kurvenschar 4;

Z = konstant bzw. I = konstant, entsprechend der Kurvenschar 5.

Bei unterteiltem Stromrichter lassen sich die einzelnen Motoren oder zumindest die Drehgestelle individuell steuern. Die Zugkraft kann den unterschiedlichen Achsdrücken angepasst

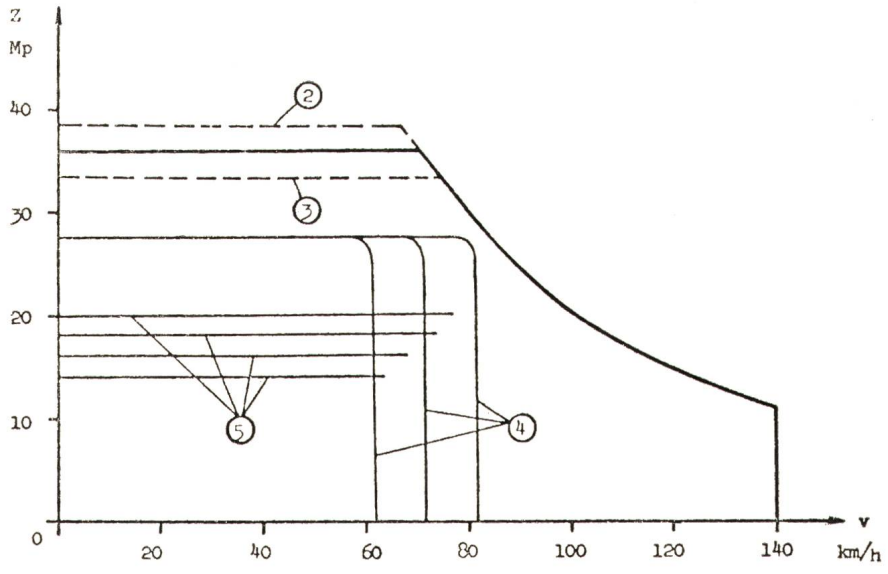


Fig. 4
Möglichkeiten von Z-V-Charakteristiken bei Thyristorspeisung
② Zugkraft des vorlaufenden Drehgestells
③ Zugkraft des nachlaufenden Drehgestells
} Zugkraftanpassung an ungleiche Achsdrücke
④ geregelte Kurven für konstante Geschwindigkeit
⑤ geregelte Kurven für konstante Zugkraft

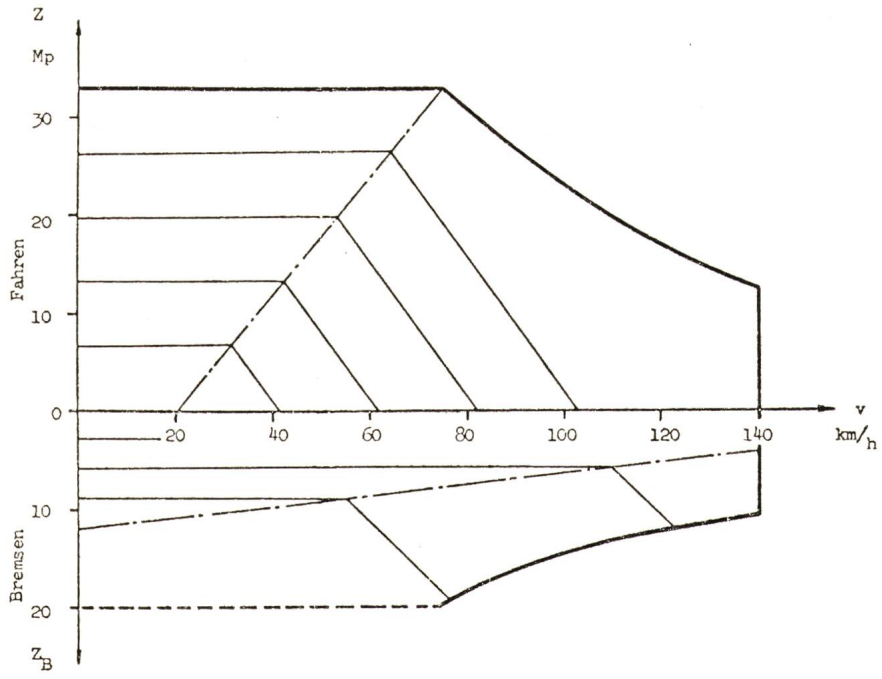


Fig. 5
Z-V-Charakteristik einer Thyristorlokomotive

werden, welche durch die sog. «Achsentlastung» hervorgerufen werden. Die Kurven 2 und 3 in Fig. 4 zeigen eine solche Möglichkeit. Dem vorlaufenden, entlasteten Drehgestell entspricht Kurve 3, dem nachlaufenden, mehrbelasteten Kurve 2.

Zusammen mit einer Schlupfregelung lässt sich auch eine Steuerung realisieren, die jeder Achse bzw. jedem Motor die adhäsionstechnisch momentan grösstmögliche Zugkraft zuordnet [19]. Hier sei sogleich auf die Problematik unterschiedlicher Motorbelastungen hingewiesen, die vom Standpunkt der Motorausnützung gesehen nur für kurzzeitigen Betrieb vertretbar sind.

Mit einem vollgesteuerten Stromrichter kann auf Wechselrichterbetrieb übergegangen werden, was die elektrische Nutzbremsung ermöglicht. Das entsprechende *Z-V*-Feld lässt wiederum praktisch beliebige Regulierkurven zu. Für die Motoren wird dabei mit Vorteil eine gemischte Serie- und Fremderregung verwendet oder auch reine Fremderregung.

Fig. 5 zeigt die für eine 80-t-Thyristorlokomotive möglichen Kennlinien im Traktions- und Bremsbereich (Rekuperationsbremse, Wechselrichterbetrieb).

Beim Wechselrichterbetrieb ermöglicht die gemischte Erregung, den Motorstrom auch bei transienten Vorgängen zu stabilisieren, indem die Seriewicklung als Gegenkompoundwicklung geschaltet wird.

Der Thyristor eröffnet der Steuerung und Regulierung der Fahrmotoren alle Möglichkeiten. Die jeweils zu wählende Lösung ist dabei von den Betriebserfordernissen, den resultierenden traktionstechnischen Vorteilen und dem zulässigen Aufwand an Steuerungs- und Regelungsorganen abhängig.

4.1.2 Die Auswirkungen auf den Kollektormotor

Welche Konsequenzen ergeben sich für den Kollektormotor? Folgende Punkte sollen diskutiert werden:

a) Auswirkung der Spannungs- und Stromoberwellen auf den Motor;
b) Auswirkung der möglichen Regelungstechniken;
c) Transiente Vorgänge;
d) Schutz des Motors bei Defekt.

4.1.2.1 Auswirkung der zusätzlichen Spannungs- und Stromoberwellen auf den Motor. Dieses Thema wurde schon beim Schritt von der Gleichstromspeisung zur Gleichrichterspeisung aktuell; eine Grosszahl von Veröffentlichungen liegen darüber vor, wobei eine kleine Auswahl [4; 5; 9; 15] im Literaturnachweis aufgeführt ist.

Als wesentliche Erkenntnisse resultieren:

Bezüglich Stromoberwellen:

Die dem Gleichstromglied überlagerten Oberwellen erfordern Massnahmen zur Reduktion der Zusatzverluste in den einzelnen Wicklungen. Bezüglich Kommutation wird die Forderung gestellt, dass das Wendefeld den Stromoberwellen möglichst ungedämpft folgt, da sonst zusätzliche Restspannungen unter der Bürste die Kommutation verschlechtern. Diese Effekte können durch externe Glättung des Stromes auf ein Minimum reduziert werden, was einen entsprechenden Aufwand erfordert und auf der Primärseite — im Fahrdraht — eine grössere, unerwünschte Verzerrung der Stromkurve ergibt. So wird häufig eine minimale Stromwelligkeit vorgeschrieben.

Spannungsoberwellen:

Je nach Schaltungsart (Mischstrom oder Mischspannung) erscheint ein Bruchteil oder aber die volle, vom Gleichrichter oder Stromrichter abgegebene Spannungswelligkeit an den Motorklemmen. Im zweiten Fall muss sie vom Motor durch eine entsprechende Hauptflusspulsation aufgenommen werden, was nur mit einem lamellierten Stator möglich ist. Im Motor entstehen zusätzliche Eisenverluste, im kombinierten shunt R_C (Fig. 1b) zusätzliche Ohmsche Verluste — dafür entfallen die motorexternen Glättungseinrichtungen und ihre Verluste [4; 9].

Der Thyristor ermöglicht Anschnittsteuerung und damit die stufenlose Spannungsregulierung. Je nach Anzahl der verwendeten Stromrichterbrücken und der Art der Folgesteuerung resultiert ein unterschiedlicher zusätzlicher Oberwellenanteil in der Spannung und im Strom gegenüber dem ungesteuerten Gleichrichter, was aus der bekannten Darstellungsart nach Fig. 6 ersichtlich ist.

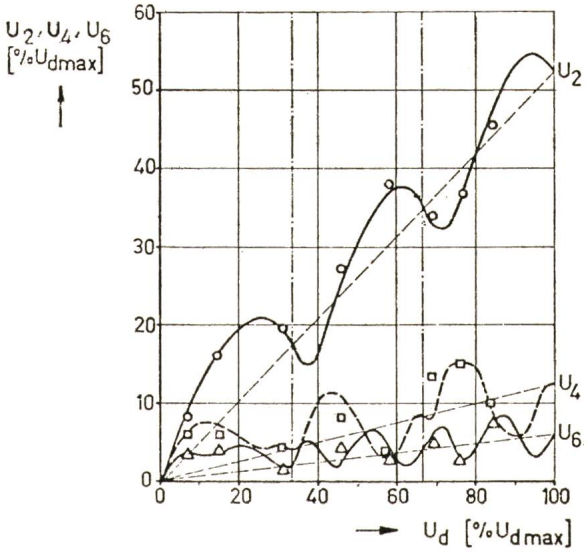


Fig. 6
Oberwellen der Gleichrichter, bzw. Stromrichter-Ausgangsspannung

--- Gleichrichter; ═══ Stromrichter bei 3 halbgesteuerten Brükken in Folgesteuerung; U_2 Oberwellenspannung doppelter Netzfrequenz; U_4, U_6 Oberwellenspannung 4facher bzw. 6facher Netzfrequenz; U_d Gleichspannung;
○□△ Messwerte

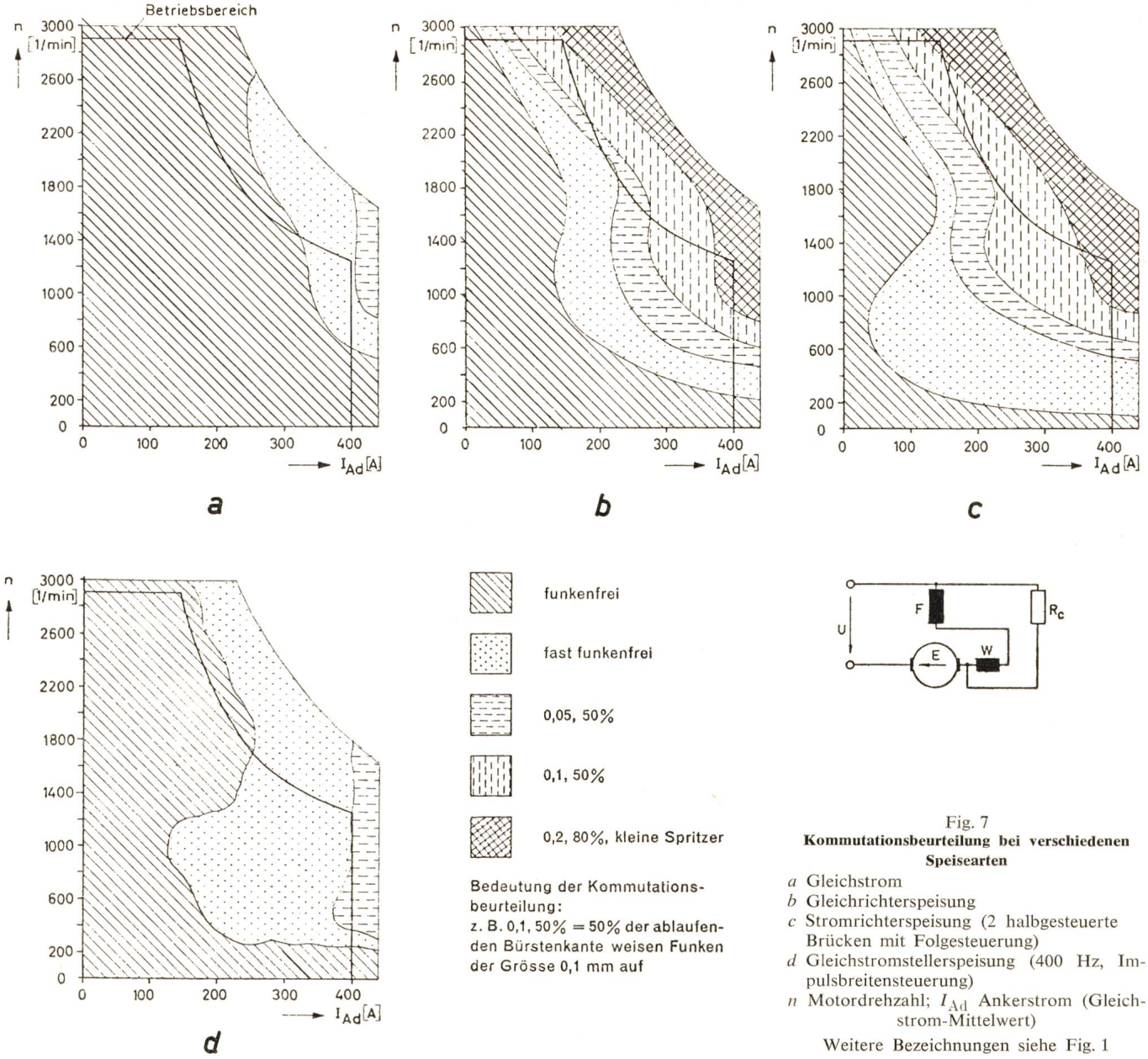


Fig. 7
Kommutationsbeurteilung bei verschiedenen Speisearten

a Gleichstrom
b Gleichrichterspeisung
c Stromrichterspeisung (2 halbgesteuerte Brücken mit Folgesteuerung)
d Gleichstromstellerspeisung (400 Hz, Impulsbreitensteuerung)
n Motordrehzahl; I_{Ad} Ankerstrom (Gleichstrom-Mittelwert)

Weitere Bezeichnungen siehe Fig. 1

Die Massnahmen im Motor zur Reduktion der Oberwellen-Zusatzverluste beziehen sich vor allem auf die Statorwicklung, insbesondere Lage und Unterteilung der einzelnen Spulenpakete. Sind Hauptflusspulsationen zu erwarten, so ist selbstverständlich eine teilweise Lamellierung des Statorjochs nötig. Eingehende Untersuchungen wurden schon an anderer Stelle [5; 9; 15] gemacht und sollen hier nicht mehr diskutiert werden. Hingegen soll der Einfluss der Oberwellen auf die Kommutation und den Kollektor etwas näher betrachtet werden.

4.1.2.1.1 Kohlen- und Kollektorabnützung. Der Kohlenverbrauch und vor allem die Standzeit des Kollektors zwischen zwei Überdrehungen sind für den Betriebsfachmann von grosser Wichtigkeit. Für den Kommutierungsapparat bringt der nur teilweise ausgesteuerte Stromrichter folgende Mehrbelastung gegenüber dem Gleichrichter:

a) Grösserer Anteil an nichtkompensierten Oberwellen-Reaktanzspannungen Δe_{Rv}, deren Anteil von der Ausbildung des Stators (Blechungsanteil für den Wendefluss) abhängig ist. Für Stromoberwellenfrequenzen über 500 Hz weist auch der vollgeblechte Stator eine merkbare Dämpfung im Wendefeldkreis auf, die eine vollständige Kompensation der entsprechenden Reaktanzspannung unter dem Wendepol verunmöglicht.

b) Nichtkompensierte Spannungen der Transformation Δe_{Tv}. Je nach Schaltungsart des Motors, je nach der gewählten Dämpfung des Hauptflusses resultiert bei Stromrichterspeisung keine oder eine bestimmte Flusswelligkeit. Diese erzeugt bekanntlich in den kommutierenden Ankerspulen eine Spannung der Transformation e_{Tv}. Bei Motoren mit ausgeprägter Flusswelligkeit, z. B. Einphasen-Seriemotor als Extremfall oder beim Wellenspannungsmotor [4], wird diese Spannung durch geeignete Mittel kompensiert, wobei dies nicht für alle Drehzahlen gleich gut möglich ist, so dass im allgemeinen eine Restspannung Δe_{Tv} unter der Bürste wirksam wird.

Gegenüber dem Gleichrichterbetrieb ist für einen bestimmten Schaltungs- und Motortyp bei Anschnittsteuerung auch mit einem gewissen Mehrbetrag von Δe_{Tv} zu rechnen.

Die beiden Spannungen Δe_{Rv} und Δe_{Tv}, die gleiche Frequenzen, aber nicht unbedingt die gleiche Phasenlage haben, können zu einer Rest-Oberwellenspannung Δe_v vereinigt werden. Die Summe aller Δe_v ist für die zusätzliche Bürstenbelastung massgebend. Im allgemeinen wird $\sum_{v=2}^{n} \Delta e$ für Thyristorspeisung im Anschnittbereich grösser sein als bei Gleichrichterspeisung bzw. Vollaussteuerung.

Die sichtbare Auswirkung der Restspannungen auf die Kommutation wurde an einem Extremversuch überprüft. Versuchsobjekt war ein im Stator geblechter 200-kW-Motor, ausgerüstet mit kombiniertem Ohmschen Shunt über Feld- und Wendepolwicklung zur Kompensation der e_{Tv}. Die

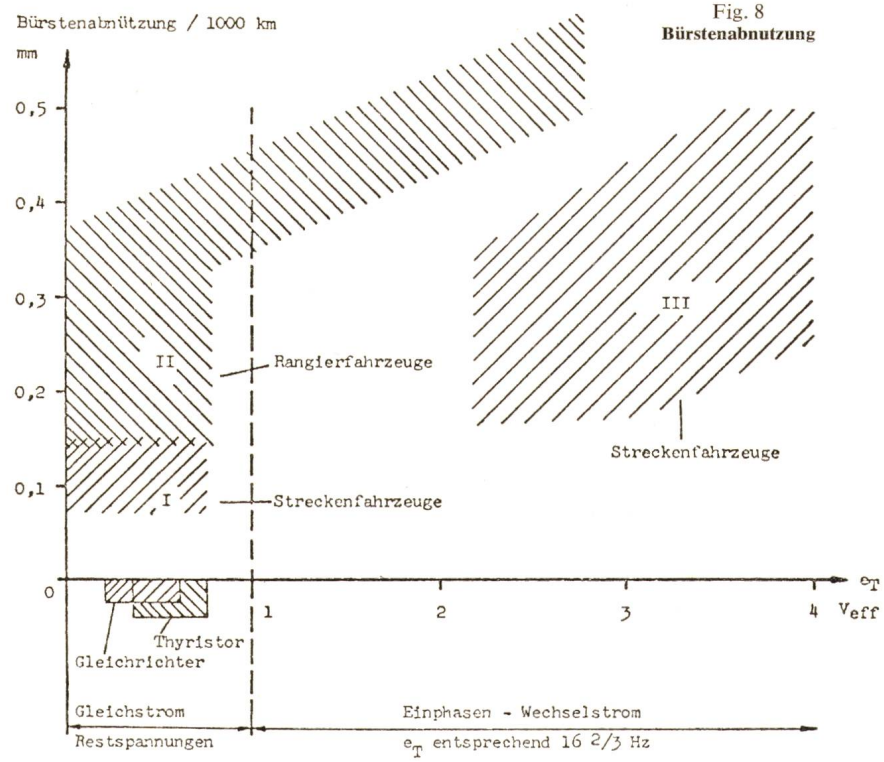


Fig. 8
Bürstenabnutzung

Kommutationsbeurteilung wurde bei extremen Flusswelligkeiten von bis zu 60 % und Ankerstromwelligkeiten bis zu 85 % durchgeführt.

$$\left(W = \frac{I_{max} - I_{min}}{I_{max} + I_{min}}\right)$$

Fig. 7 zeigt die Gegenüberstellung der Kommutationsbeurteilung bei verschiedenen Speisearten, insbesondere Gleichrichter- und Thyristorspeisung. Der Einfluss der Teilaussteuerung im unteren Drehzahlbereich des Motors ist deutlich sichtbar. Praktisch unbeeinflusst bleibt der Drehzahlbereich mit optimaler Kompensation der e_{Tv}, der zwischen etwa 1400 und 2600 U./min liegt.

Die Kommutationsbeobachtung allein gibt keine direkte Auskunft über den durch Restspannungen bewirkten Mehrverbrauch an Kohlen. Noch weniger ist eine direkte Beziehung zur Kollektorabnützung zu formulieren. Für den zusätzlichen Kohleverbrauch können die Verhältnisse beim Einphasen-Wechselstrom-Kollektormotor einen gewissen Hinweis geben. Die dort auftretende e_T von Netzfrequenz hat eine definierte Grösse. Sie ist bei einer wählbaren Drehzahl kompensierbar. Die Restspannung Δe_{T_I} (beim Einphasen-Wechselstrommotor eine stromabhängige Grösse) kann wie folgt angeschrieben werden:

$$\Delta e_{T_I} = e_{T_I} \frac{n_{komp.} - n}{n_{komp.}}$$

worin

n Motordrehzahl; $n_{komp.}$ Kompensationsdrehzahl; e_{T_I} strom- bzw. flussabhängige e_T, bei Nennstrom, für 16⅔ Hz Netzfrequenz, im Bereich von 2,5...3,5 V liegend, bedeuten.

Je nach Betriebseinsatz arbeitet der Motor mehr oder weniger im Bereich $n = n_{komp.}$ Streckenlokomotiven im Rampenbetrieb (z. B. Gotthard) fahren hauptsächlich mit $n \sim n_{komp.}$, während Verschiebelokomotiven viel häufiger $n < n_{komp.}$ aufweisen.

Der Kohle-Zusatzverbrauch ist abhängig von Dauer und Grösse der Δe_{T_I} über eine bestimmte Betriebszeit. Theoretisch müsste eine auslegungsmässig höhere e_{T_I} einen grösseren Zusatzverbrauch verursachen.

Fig. 8 zeigt eine Darstellung der Kohlenabnützung von Traktionsmotoren in Funktion der e_T bzw. der Restspannungen $\Sigma \Delta e$. Die Verbrauchswerte basieren auf Messungen an einer grösseren Anzahl von verschiedenen Fahrzeugtypen des schweizerischen Normalspurnetzes. Die Grössenangabe für Restspannungen im Gleichrichter- bzw. Stromrichterbetrieb entspricht einer Schätzung.

Bereich I, Streckenfahrzeuge: Gleichstrom- (Diesel-), Gleichrichter- und Thyristorspeisung. Der Bereich ist sehr eng und liegt bei 0,1 mm/1000 km.

Bereich II, Rangierfahrzeuge: Thyristor-, Gleichrichter-, Wechselstrom - Direktmotoren. Der Einsatz ist sehr verschiedenartig, entsprechend auch die Kohlenabnützung, die im allgemeinen höher ist als im Bereich III und I.

Bereich III, Streckenfahrzeuge: Einphasen-Wechselstrommotoren. Auffallend ist der grosse Streubereich der gemessenen Abnützungen je nach Fahrzeugart und Betriebsfall.

Setzt man voraus, dass es sich überall um gleichstrommässig gut kommutierende Motoren handelt (d. h. sie würden im Gleichstrombetrieb eine Bürstenabnützung von ca. 0,1 mm/1000 km aufweisen), so kann man aus der Darstellung den Einfluss von Restspannungen bzw. e_T im Wechselstrombetrieb entnehmen.

Die im Bereich von einigen $^1/_{10}$ V liegenden Restspannungen $\Sigma \Delta e_v$ sind sowohl im Gleichrichter- als auch im Thyristorbetrieb weit weniger wirksam als die Δe_T im Wechselstrombetrieb, die im Stillstand und bei Stundenstrom dem Spannungsmaßstab in Fig. 8 entsprechen, bei der Kompensationsdrehzahl auf 0 kompensiert werden. Die betriebsmässigen Kohlenabnützungen von Thyristorfahrzeugen liegen in der Folge in der gleichen Grösse wie für Gleichrichterbetrieb oder sogar Gleichstrombetrieb.

Interessant ist das Messresultat eines Traktors der Berner Alpenbahnen (BLS). Durch Einbau eines Stromrichters wurde der Kohleverbrauch des Einphasen-Wechselstrommotors von 0,5...0,7 mm auf 0,15 mm/1000 km reduziert, wobei zu berücksichtigen ist, dass Traktoren einen allgemein grösseren Kohleverbrauch aufweisen als Streckenfahrzeuge. Die Zusatz-Oberwellen des Thyristorbetriebs lassen also keinen Anstieg des Kohleverbrauchs gegenüber dem Gleichrichterbetrieb erwarten.

4.1.2.1.2 Das Verhalten des Kollektors. Eine weitere Frage betrifft das Verhalten des Kollektors, insbesondere der ohne Kollektorbehandlung erreichbaren Kilometerleistung. Je nach Fahrzeugtyp und Einsatz werden heute Laufleistungen zwischen 200000 und 1,5 Mill. km erwartet. Es liegt nahe zu vermuten, dass die mit dem recht grossen Anteil Δe_T belasteten Einphasen-Kollektormotoren am schlechtesten dastehen würden. Dies ist aber nicht der Fall. Lokomotivmotoren für 16⅔ Hz von 800 kW Stundenleistung erreichen heute Laufleistungen von 1 Mill. km und mehr, Werte, die auch für Gleichstrommotoren nicht immer eine Selbstverständlichkeit sind. Die Kollektorstandzeit von modernen Motoren aller Speisearten kann folglich nicht mit Restspannungen und Kohleverbrauch in direkten Zusammenhang gebracht werden. Diese Feststel-

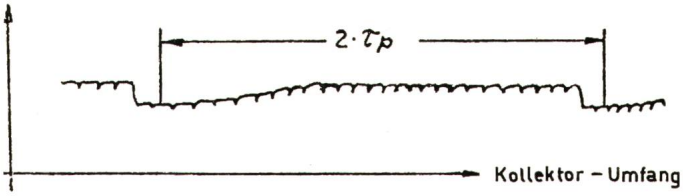


Fig. 9
«Lochbildung» am Kollektor
τ_p Polteilung

lung wird durch die Tatsache erhärtet, dass gewisse schädliche Veränderungen der Kollektorlauffläche, die schliesslich ein Überdrehen nötig machen, in der gleichen Art bei allen Stromsystemen auftreten.

Zwei Typen solcher Veränderungen, die nicht mit einer mechanischen Verwerfung des Kollektorbelags zusammenhängen, seien erwähnt:

a) Bildung einzelner schwarzer, vertiefter Stellen (Lochbildung) (Fig. 9) am Umfang des Kollektors, wobei diese häufig im Abstand von 2 Polteilungen auftreten.

Diese Lochbildung ist vorwiegend bei einer Drehrichtung in laufenden Maschinen aller Speisearten anzutreffen. Bei Traktionsmotoren wird — oft zu Unrecht — ein Blockieren des Fahrzeuges bei belastetem Motor als Ursache vermutet. Da die gleiche Erscheinung auch bei Hilfsbetriebsmotoren, die meist ohne Last anlaufen, genau gleich anzutreffen sind, muss es sich eher um ein allgemeines Kontaktproblem des Kollektors handeln. Eine sehr interessante Bestätigung in dieser Hinsicht gibt der neuste Bericht von Prof. *Bates* [7], der Flecken- und Lochbildung bei seinem «Thyristor assisted commutator» feststellt, also unter Umständen, wo keine eigentlichen Schaltvorgänge mehr auf dem Kollektor stattfinden, wohl aber ein örtlich rascher Stromanstieg vorhanden ist. Die Flecken entsprechen denn auch dem Einschaltmoment der Thyristoren. Abhilfemassnahmen bestehen aus speziellen Hilfsbürsten.

b) Bildung von mehr oder weniger regelmässigen Wellen im Abstand von einer Polteilung oder eines Bruchteils derselben, die schliesslich ein Überdrehen des Kollektors erfordern. Diese Wellenbildung ist in einer fast identischen Form bei Motoren aller Speisesysteme anzutreffen.

Das Erscheinen einer solchen Welligkeit, die leider sehr häufig zu finden ist, wird in vielen Fällen massgebend für das Revisionsintervall des Kollektors, wobei es sich um einen Bereich mit unterer Grenze um 30000 km, mit oberer um 1000000 km Fahrzeuglaufleistung handelt. Stuft man die 4 gezeigten Beispiele in den Spannungsmaßstab der Fig. 10 ein, so erkennt man, dass der Effekt «Welliger Kollektor» auf dem ganzen Gebiet von 0...4 V der Oberwellen-Restspannungen bzw. der e_T anzutreffen ist. Ein Mehr oder Weniger an Oberwellen-Restspannungen in der Grösse von einigen $^1/_{10}$ V hat keinen massgeblichen Einfluss auf die Wellenbildung, die ihrerseits einen wesentlichen Beeinflussungsfaktor der Kollektorstandzeit darstellt.

4.1.2.2 Auswirkung der möglichen Regelungstechniken auf die Kommutation bezüglich Strombelastung. Bereits die Einführung von automatischen Stufenschaltsteuerungen zeigte eine eigentlich unerwartete Mehrbeanspruchung von Kohlen und Kollektor im Bereich des Anfahrstromes. Es scheint sich dabei um 2 Effekte zu handeln:

a) Die Automatik hält den vorgegebenen Anfahrstrom dauernd bei, sei es stufenweise oder bei Thyristorspeisung als konstanten Wert, während bei Handschaltung jede Ablenkung des Lokomotivführers zu einem Stromrückfall führte (Fig. 11, Kurven 2, 3, 1). Die Automatik bringt also eine höhere mittlere Anfahrbeschleunigung und damit eine Mehrbelastung, vor allem des Kollektors.

b) Bei den im Anfahrvorgang üblichen hohen Bürstenstromdichten ist die Kommutationsqualität vom zeitlichen Stromverlauf abhängig. Ein kurzer Rückfall in der Strombelastung bringt für den Kontakt Kohle-Kollektor eine Verbesserung der Stromübergangszonen, so dass nach erfolgtem Wiederanstieg des Stromes, zum Beispiel nach 5...10 s, eine bessere Kommutationsqualität vorliegt. Der gleiche Motor kommutiert im Punkt A bei einem Stromverlauf nach 1 besser als beim Verlauf nach 2. Die Motorauslegung muss also den erhöhten Anfahranforderungen, speziell bei der stufenlosen Thyristor-Speisung, Rechnung tragen.

4.1.2.3 Transiente Vorgänge. Bei raschen Änderungen der Motorklemmenspannung bzw. kurzzeitigem Ausfall, z. B. bei Absprüngen des Pantographen, sowie bei externen Kurzschlüssen werden an den Motor durch die entstehenden Stromstösse erhöhte Anforderungen gestellt. Eine Thyristorspeisung erlaubt, zusammen mit der Stromregelung, ein sofortiges Eingreifen in den Stromkreis, so dass zum Beispiel eine kurzzeitige völlige Sperrung des Stromes und anschliessend ein langsames Wiederansteigen auf den Sollwert erreicht wird.

Für den Motor bedeutet dies eine Erleichterung, so dass spezielle bauliche Massnahmen zur Beherrschung von Stromstössen weniger aktuell werden.

4.1.2.4 Schutz des Motors bei Defekten. Im allgemeinen besteht dieser Schutz aus einem Maximalstrom-Relais sowie aus einer Erdschlussüberwachung. Für die letztere ergeben sich grundsätzlich keine neuen Gesichtspunkte. Bei der Anwendung der individuellen Stromregelung pro Motor oder pro zwei Motoren genügt aber das Maximalstromrelais nicht mehr. Die Stromregelung wird auch bei einem Fehler im Motor den

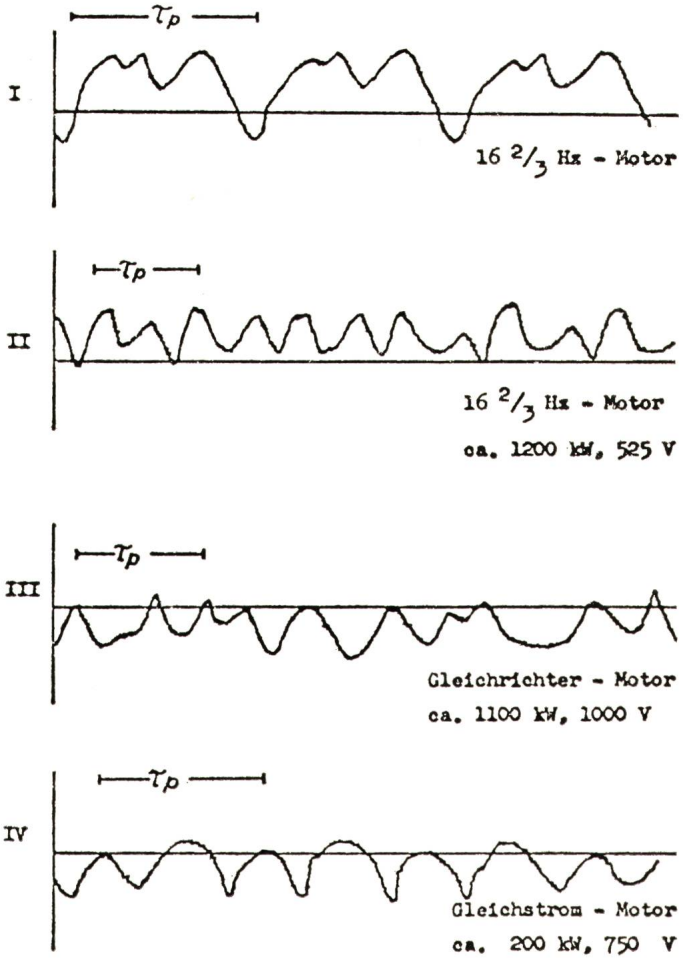


Fig. 10
Wellenbildung am Kollektor
Die 4 Motoren (I—IV) haben praktisch keine gemeinsamen Daten und sind verschieden bezüglich: Speisung und Einsatzart; Konstruktionsfirma; Herstellerwerk; Art der Ankerwicklung; Art der Bürstenhalter und der Kohlesorte; Form des Wendepolkopfes; Anteil der Statorjoch-Lamellierung

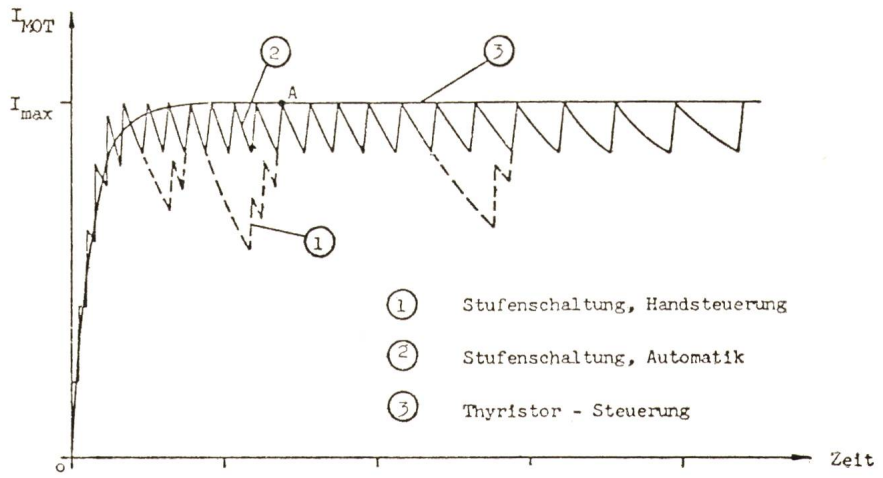


Fig. 11
Verschiedene Aufschaltmöglichkeiten
I_{max} maximaler Anfahrstrom; I_{MOT} Motorstrom

Strom auf den Sollwert begrenzen, nicht aber unterbrechen. Die Motorüberwachung wird komplizierter und aufwendiger und muss zum Beispiel zusätzlich den Vergleich der Klemmenspannungen der Motoren umfassen.

Gesamthaft betrachtet, resultieren für die Gruppe «Kollektormotoren mit Speisung über Stromrichter aus dem Einphasen-Wechselstromnetz» viele Vorzüge bei geringfügigen Erschwerungen.

Die Betriebserfahrungen mit verschiedenen Fahrzeugtypen, z. B. Rangierfahrzeuge der Schweizerischen Bundesbahnen im Bahnhof Basel oder die 6200 PS B_oB_o-Lokomotive Re 4/4 [6] der Berner Alpenbahnen, bestätigen denn auch die traktionstechnischen Vorteile der Thyristorspeisung. Ähnliche positive Erfahrungen liegen auch von anderen europäischen Bahngesellschaften vor.

4.2 Gleichstrom-Kollektormotor mit Speisung über Gleichstromsteller [14]

4.2.1 Die Möglichkeiten

Der Gleichstromsteller erlaubt, die Anfahrwiderstände zu eliminieren, was gleichzeitig 3 Vorteile bietet:

a) Steile Z-V-Charakteristik, entsprechend der Serie (oder Gemischt)-Erregungscharakteristik des Motors für konstante Ausgangsspannung am Gleichstromsteller (Fig. 12, Kurven 1 bzw. 2).

b) Stufenlose Zugkraftregulierung, beliebige Reguliermöglichkeiten im ganzen Z-V-Bereich.

c) Wegfall der Energieverluste im Anfahrwiderstand.

a) und b) entsprechen den bereits unter Abschnitt 4.1 diskutierten Vorteilen, aber in ausgeprägterem Mass, da bisher der Vorwiderstand, vor allem im untersten Geschwindigkeitsbereich, eine sehr flache Z-V-Charakteristik, d. h. ein kleines $\Delta Z/\Delta V$ ergab. Elektrische Bremsung in Form der Rekuperationsbremse ist mit dem Gleichstromsteller ebenfalls möglich. Im gesamten eröffnet sich für das Gleichstromfahrzeug eine analoge Regulier- und Anpassmöglichkeit an alle Betriebsbedingungen und Adhäsionsverhältnisse, wie sie für das Wechselstromfahrzeug gezeigt wurden.

Betreffend der Motor-Auslegung besteht die eher theoretische Möglichkeit, die Nenn-Klemmenspannung tiefer als die Fahrdrahtspannung zu wählen, um günstigere Motorbemessungen zu erhalten. Am Gleichstromsteller erfordert dieses Prinzip aber einen Mehraufwand.

4.2.2 Die Auswirkung auf den Kollektormotor

Die vom Gleichstromsteller erzeugte Speisespannung (Spannungsimpulse) stellt im Prinzip einen Gleichstrom-Mittelwert, überlagert von Oberwellen, dar. Für den Motor bestehen ähnliche Bedingungen wie bei Stromrichterspeisung, und die unter Ziff. 4.1.2 gemachten Betrachtungen können weitgehend übernommen werden.

Bei der hohen Pulsfrequenz (meist über 200 Hz) liefern die Streureaktanzen des Motors bereits einen namhaften Betrag zur Stromglättung, so dass zusätzliche motorexterne Glättungsmittel reduziert oder weggelassen werden können.

Günstig wirkt sich die Tatsache aus, dass bei voller Spannung die Spannungs- und Stromwelligkeit am kleinsten ist, was bedeutet, dass der Motor bei voller Last und voller Drehzahl annähernd mit Gleichstrom gespeist wird. Die Kommutationskarte in Fig.7 zeigt in diesem Bereich praktisch keinen Unterschied zu Gleichstrom.

Bei Teilaussteuerung des Gleichstromstellers und damit höherem Oberwellenge-

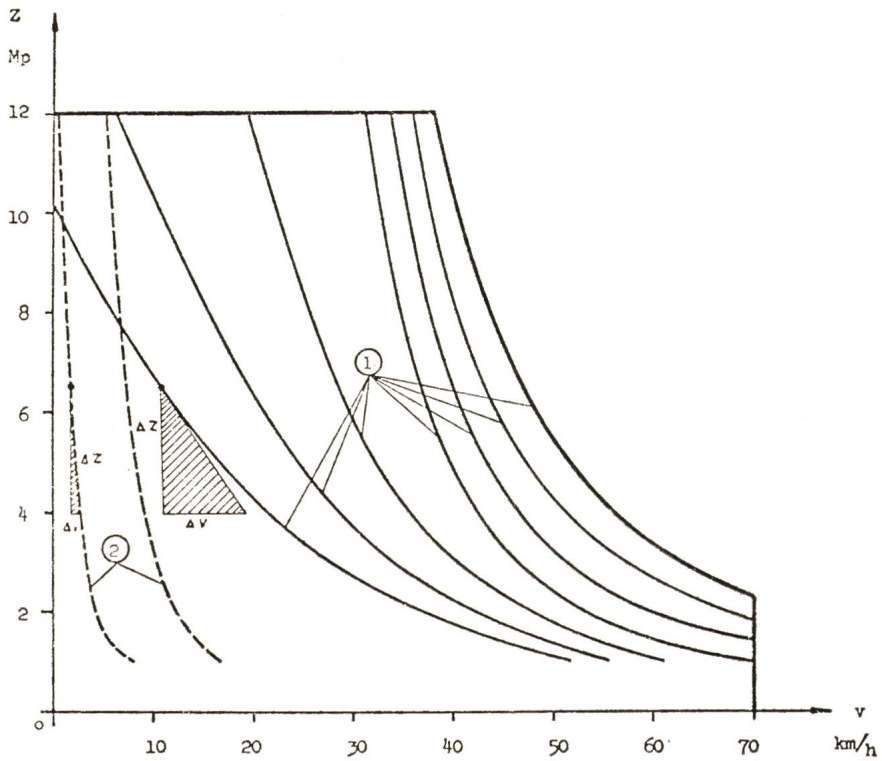
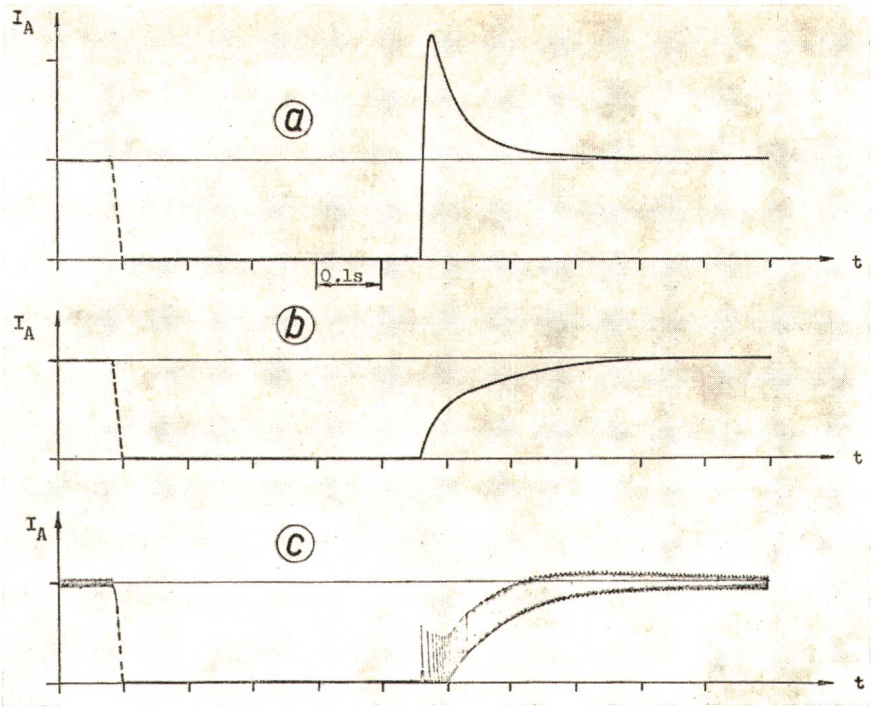


Fig. 12
Z-V-Charakteristik eines Gleichstromfahrzeuges
(schematisch)
1 mit Anfahrwiderständen
2 Charakteristik bei konstruierter Klemmspannung (entspricht Gleichstromstellerbetrieb)

Fig. 13
Ankerstromverlauf bei Spannungsunterbruch
a Gleichstrommotor mit massivem Statorjoch;
b Gleichstrommotor mit geblechtem Statorjoch;
c Gleichstrommotor wie unter *a*, aber Speisung mit Gleichstromsteller; I_A Ankerstrom; *t* Zeit



halt läuft der Motor mit reduzierter Drehzahl, wobei die Kommutation bekanntlich mehr Störungen durch Restspannungen erträgt. Eine spezielle Ausbildung des Motors wie im Fall der Wechselstrom-Thyristorsteuerung ist daher nicht unbedingt nötig.

Bei transienten Vorgängen, z. B. kurzzeitigem Spannungsunterbruch, bietet der Gleichstromsteller eindeutige Vorteile. Fig. 13 zeigt den Ankerstromverlauf eines Motors unter folgenden Bedingungen:

a) Normaler Gleichstrommotor mit massivem Statorjoch. Starkes Überschwingen des Stromes, verbunden mit Kommutationsstörung.

b) Gleicher Vorgang bei einem Motor, der mit lamelliertem Statorjoch, also entdämpftem Feldkreis, ausgerüstet ist. Dank dem sofortigen Feldaufbau bei Wiedereinschaltung erfolgt kein Überschwingen des Ankerstromes, sondern ein relativ sanfter Anstieg [8].

c) Motor wie unter a), aber mit Gleichstromsteller gespeist, dessen Steuerung den Spannungsunterbruch automatisch erfasst, den Strom bei Rückkehr der Spannung sperrt und anschliessend sanft ansteigen lässt [12].

Der Motor wird also bei transienten Vorgängen durch den Gleichstromsteller geschützt. Bezüglich Spannungsbeanspruchung ändert sich gegenüber Gleichstrombetrieb nicht viel: der Motor ist dem Potential des Fahrdrahtes ausgesetzt. Unter Umständen muss er zusätzliche Schaltspannungen des Gleichstromstellers aufnehmen. Die für den Gleichstrommotor gültige Abhängigkeit von der Fahrdrahtspannung bezüglich Klemmenspannung und Isolationsniveau bleibt also bestehen.

Zusammenfassend: Die Mehrzahl der technischen Vorteile, die der Gleichstromsteller traktionstechnisch und für den Motor bringt, überwiegen die durch Oberwellen oder Spannungsspitzen gegebenen Mehrbelastungen. Erste Versuchsfahrzeuge mit Chopper-Ausrüstungen, wie z. B. die Trolleybusse St. Gallen, zeichnen sich entsprechend durch die sanfte, stufenlose Anfahrt und Bremsung bei gleichzeitig hohem Beschleunigungsvermögen aus.

4.3 Thyristor assisted commutation [16; 17]

Das Prinzip, den Kollektor mittels Thyristoren von jeglichen Schaltvorgängen zu entlasten, ist sehr einleuchtend und könnte eine Vereinfachung des Kollektormotors bringen. Die bisher durchgeführten Untersuchungen zeigen aber, dass durch Elimination des Schaltvorganges vom Kollektor das Stromübertragungsproblem, insbesondere bei dem durch das Schalten der Thyristoren gegebenen steilen Stromanstieg, durchaus nicht gelöst ist. Der Kollektor zeigt an ganz bestimmten Stellen Flecken, die sich zu den bei konventionellen Motoren bekannten Flachstellen auswachsen. Sie liegen örtlich an der Stelle, wo der Thyristor, mit steilem Anstieg, den Strom zuschaltet. Eine Abhilfe wurde in Form spezieller Bürsten, die auf einem Hilfskollektor laufen, gefunden.

Eine Beurteilung der Möglichkeiten und Betriebsbedingungen dieses Konzepts ist sicher verfrüht. Die gemachten Feststellungen erlauben aber interessante Rückschlüsse auf allgemeine Kommutationsprobleme an Kollektormotoren, wie sie bereits kurz geschildert wurden.

4.4 Kollektorlose Motoren

4.4.1 Die Möglichkeiten

Die allgemeine Anwendung des Drehfeldmotors in der Traktion analog dem Kollektormotor setzt eine variable Frequenz der Speisequelle voraus. Der Thyristor erlaubt heute den Bau statischer Phasen- und Frequenzumformer.

Charakteristik:

Die für eine feste Frequenz bei konstanter Spannung resultierende Motorcharakteristik weist einen sehr steilen Verlauf auf, also ein grosses $\Delta Z/\Delta V$, was adhäsionstechnisch sehr vorteilhaft ist. Die mit externen Regelungen erreichbare Fahrzeugcharakteristik kann innerhalb des zur Verfügung stehenden Z-V-Feldes jede gewünschte Lage und Form haben analog der Thyristor-Traktion mit Kollektormotoren.

Parallellauf:

Werden mehrere Motoren durch den gleichen Umrichter gespeist, so ist die Drehzahl der Motoren durch die gemeinsame Frequenz elektrisch gekuppelt, was einerseits adhäsionstechnische Vorteile hat, anderseits bestimmte Grenzen für die zulässigen Raddurchmesser-Unterschiede stellt.

Rekuperation:

Die Möglichkeit einer wirksamen elektrischen Bremse (Rekuperation) ist gegeben.

Motorbauweise:

Die durch den Kollektor bedingten Einschränkungen bezüglich Durchmesserwahl und Drehzahl entfallen. Für ein bestimmtes Traktionsprogramm wird der Drehfeldmotor bzw. der Asynchronmotor kleiner, leichter und rascher laufend. Dadurch werden in bezug auf die mechanische Konstruktion neue Lösungen möglich. Durch den Wegfall des Kollektors und, beim Asynchronmotor, der isolierten Ankerwicklung ergeben sich wartungstechnische Vereinfachungen.

Eine andere Ausführungsart des Drehfeldmotors weist eine Gleichstromerregung im Rotor auf. Je nach Speiseart wird die

Tabelle I

Motorbauart	Speiseart/Schaltung	Wichtigste Eigenschaften bezüglich Traktionstechnik					Anforderungen an den Motor				Aufwand in der Starkstromelektronik	
		T - Thyristoren	Günstige Form der Z-V-Char. bei konst. Spannung	Beliebige Form der Fahrzeugcharakt. möglich	Stufenlosigkeit	Kleine Motorbauart	Spannungsoberwellen	Stromoberwellen	Δe_T	Transiente Vorgänge	Stromrichter Umrichter	Glättungseinrichtungen
Gleichstrom massiv	Gleichstrom ab Fahrleitung		○	○	○	◔	○	○	○	●	○	○
Einphasen-Wechselstrom geblecht	Einphasen-Wechselstrom		◔	○	○	○	●	●	●	◑	○	○
Mischstrom wenig geblecht	Gleichrichter/ Wellenstrom		●	○	○	◔	◔	◑	◔	◑	◔	◕
Mischstrom teilweise gebl.	Gleichrichter/ Wellenspannung		●	○	○	◔	◕	◑	◕	◔	◔	○
Mischstrom wenig geblecht	Stromrichter/ Wellenstrom	T	●	●	●	◔	◔	◑	◔	◔	◕	◕
Mischstrom teilweise gebl.	Stromrichter/ Wellenspannung	T	●	●	●	◔	◕	◑	◕	◔	◕	○
Gleichstrom wenig geblecht	Gleichstromsteller	T	●	●	●	◔	◑	◑	◔	◔	◕	○ oder ◔
Drehfeldmotor	Umrichter	T	●	●	●	●	◕	◑	○	○	●	◑ (im Umrichter)
Thyristor-assited (nach Prof. Bates)	Stromrichter	T/T	●	●	●	◕	◔	◑	○	◔	● + ● Stromrichter Motor	◕

● Günstige Eigenschaften

● Grosse Anforderungen

● Grosser Aufwand

Maschine als Synchronmotor oder auch als kollektorloser Gleichstrommotor bezeichnet. Eine entsprechende Anwendung stellt z. B. ein Zementmühlenantrieb dar, ein über Umrichter mit variabler Frequenz gespeister Synchronmotor von 6400 kW Leistung [18].

Für die Traktionsanwendung stört die Notwendigkeit von Schleifringen oder einer anderen Übertragungseinrichtung für die Erregerleistung in einem gewissen Mass, da nach Wegfall des Kollektors grundsätzlich auf alle ähnlichen Hilfseinrichtungen verzichtet werden möchte. Günstig ist jedoch der kleine oder auf 0 reduzierte Blindleistungsbedarf dieses Maschinentyps.

4.4.2 Konsequenzen für den Motor

Im Vergleich zu einem aus dem Dreiphasennetz gespeisten stationären Drehfeldmotor ergeben sich verschiedene zusätzliche Anforderungen für den Traktionsmotor:

a) Auslegung für einen Frequenzbereich, der bis über 100 Hz reichen wird.
b) Berücksichtigung der Oberwellen in der Speisespannung und im Speisestrom in bezug auf Zusatzverluste und Bildung parasitärer Drehmomente [10].
c) Berücksichtigung der Anfahrbedingungen (mindestens doppeltes Nennmoment), die bei tiefer Frequenz erfüllt werden müssen.
d) Berücksichtigung der speziellen mechanischen und isolationstechnischen Anforderungen der Traktionstechnik.

5. Zusammenfassung

Es wird untersucht, welche Vorteile der Thyristor in bezug auf den Traktionsmotor beliebiger Bauart bringt und welche Mehrbeanspruchungen allenfalls damit verbunden sind. Die einzelnen Resultate sind einerseits in der Tabelle I zusammengefasst. Dabei sind als Vergleichsbasis auch die konventionellen Motoren und Speisearten berücksichtigt. Das Gesamtresultat kann folgendermassen formuliert werden:

Der Thyristor bringt für alle Arten von Traktionsmotoren betriebliche und traktionstechnische Vorteile.

Im Fall von Drehfeldmotoren bringt der Thyristor erst die Voraussetzung für eine generelle Anwendung dieser Motorart, ähnlich, wie sie für den Kollektormotor bekannt ist. Die zusätzlichen Anforderungen, die der Thyristor-Betrieb an die Motoren stellt, sind im Verhältnis zum Gewinn gering. Vom Standpunkt des Motorbauers aus wird die neue Technik sehr willkommen geheissen.

Der heute noch beträchtliche finanzielle Aufwand für die nicht einfache Starkstromelektronik sowie auch für deren Unterhalt dürfte in Zukunft geringer werden.

Die Rückwirkungen der Stromoberwellen über den Fahrdraht auf Signalisation und Fernmeldetechnik stellen in vielen Fällen ein wesentliches Problem dar. Das Vordringen der Thyristortechnik in der Traktion erfolgt daher behutsamer, in kleineren Quantitäten als es die vom Motorbau her sichtbaren Vorteile erwarten liessen.

Literatur

[1] *R. Germanier:* Der Triebmotor der SBB-Zweifrequenzlokomotiven Nr. 16505–06. Bull. Sécheron –(1961)30, S. 33...41.
[2] *H. P. Eggenberger:* Betrachtungen über die Kommutation von Bahnmotoren bei Speisung mit Wellenstrom. Bull. Sécheron –(1961)30, S. 42...47.
[3] *C. Bodmer u. a.:* Die 50 Hz-Oerlikon-Güterzugslokomotive CoCo, Nr. 14 001...14 020 der Société Nationale des Chemins de Fer Français (SNCF). Bull. Oerlikon –(1957)320, S. 1...24.
[4] *P. Leyvraz* und *E. Dünner:* Die elektrische Ausrüstung der Primär- und Fahrmotor-Stromkreise und ihre Steuerapparatur. Bull. Oerlikon –(1962)349/350, S. 11...16.
[5] *J. Kuhlow:* Fahrmotor für Stromrichter-Fahrzeuge. ETZ–A 88(1967)16, S. 399...405.
[6] *A. Jäger:* Die thyristorgesteuerte Lokomotive Nr. 161 der Serie Re 4/4 der Berner Alpenbahn-Gesellschaft Bern-Lötschberg-Simplon (BLS). Brown Boveri Mitt. 56(1969)11/12, S. 632...636.
[7] *J. J. Bates, J. Stanway* and *R. F. Sansum:* Contact problems in machines using thyristor-assisted commutation. Proc. IEE 117(1970)2, p. 387...397.
[8] *H. S. Sie:* Berechnung der Querinduktivitäten eines geblechten Kollektor-Bahnmotors und sein Verhalten bei transienten Vorgängen. Bull. Oerlikon –(1970)392/393, S. 31...40.
[9] *H. S. Sie* und *R. Moser:* Das Verhalten geblechter Kollektor-Bahnmotoren bei Speisung über Stromrichter oder Gleichstromsteller. Bull. Oerlikon –(1970)392/393, S. 41...50.
[10] *G. Manz:* Betrieb der Bahnmotoren bei steigenden Leistungsanforderungen. Elektr. Bahnen 41(1970)2, S. 28...35.
[11] *H. Largiadèr:* Gesichtspunkte für die Bemessung umrichtergespeister Asynchronmotoren für die Traktion. Brown Boveri Mitt. 57(1970)4, S. 152...167.
[12] *P. Knapp* und *H. Löcker:* Stromsteller für Gleichstrom-Triebfahrzeuge. E und M 85(1968)3, S. 110...117.
[13] *J. Kuhlow* und *N. Schlink:* Motoren und Antriebe für S-Bahn-Fahrzeuge. Elektr. Bahnen 41(1970)5, S. 100...106.
[14] *K. Dähter* und *W. Faust:* Elektronischer Gleichstromsteller für einen Trolleybus. Brown Boveri Mitt. 53(1966)10, S. 715...721.
[15] *T. Yamamura* and *A. Sezai:* Temperature rise of MT-200 type traction motor due to pulsating current. Quarterly Report RTRI 7(1966)2, p. 2...5.
[16] *J. J. Bates* and *T. V. Sridhar:* Thyristor-assisted sliding-contact commutation. Proc. IEE 113(1966)2, p. 339...341.
[17] *J. J. Bates:* Thyristor-assisted commutation in electrical machines. Proc. IEE 115(1968)6, p. 791...801.
[18] *E. Bläuenstein:* Der erste getriebelose Rohrmühlenantrieb. Brown Boveri Mitt. 57(1970)3, S. 96...105.
[19] *R. Moser:* Massnahmen in der elektrischen Triebfahrzeugausrüstung zur bestmöglichen Ausnützung der Adhäsion zwischen Rad und Schiene. Glasers Annalen 92(1968)7/8, S. 208...225.

Adresse des Autors:
R. Moser, Chef der Konstruktionsabteilung für Traktionsmotoren der AG Brown, Boveri & Cie., Zürich-Oerlikon, 8050 Zürich.