Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke

Band: 62 (1971)

Heft: 1

Artikel: Auslegung des Hauptstromkreises für Thyristor-Wechselstromtriebfahrzeuge

Autor: Germanier, R. / Hintze, H.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-915789

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: 09.08.2025

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

Auslegung des Hauptstromkreises für Thyristor-Wechselstromtriebfahrzeuge

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

von *R. Germanier* und *H. Hintze*, Genf

621.314.632.049:621.335

Es werden nachfolgend die Hauptstromkreise eines Thyristorfahrzeuges bildende Elemente untersucht, indem die sie beeinflussenden physikalischen Grössen studiert werden. (Fig. 1)

Es handelt sich dabei um folgende Elemente:

Haupttransformator
Thyristorgleichrichterblock
Glättungsdrosselspule
Fahrmotor
Steuerung der Thyristoren

Die Auslegung des Haupttransformators ist eng mit derjenigen des Gleichrichters verbunden, da sowohl seine Dimensionen als auch seine Nennleistung von der gewählten Schaltung des Gleichrichters (symmetrische Brückenschaltung asymmetrische Brücke, Brücken in Serie, Unterteilung der Sekundärspannung) sowie vom gewählten Kurzschlußschutz des Gleichrichters (grosse oder kleine Kurzschlußspannung) abhängig sind. Die Berechnung der Nennleistung des Transformators wird für die hauptsächlichsten Gleichrichterschaltungen unter Berücksichtigung verschiedener Kurzschlussspannungen (ca. 4 % und 10 %) entsprechend zwei verschiedenen Schutzsystemen (mit oder ohne Sicherung) bestimmt.

Es werden einige Kenndaten von Dioden und Thyristoren, die für den Einbau in Gleichrichter verwendet werden, erwähnt. Im weiteren werden die verschiedenen Schaltungen im Hinblick auf den Leistungsfaktor des Fahrzeuges sowie den Oberwellengehalt des Primärstromes untersucht. Die verschiedenen Möglichkeiten den Gleichrichter gegen Überspannungen und Kurzschlüsse zu schützen werden anhand von Beispielen ausgeführter Fahrzeuge aufgezeigt. Die Eigenheiten der Luft- und der Ölkühlung werden miteinander verglichen. Hierauf wird die Bestimmung der Glättungsdrosselspule erörtert, indem für eine gegebene Welligkeit des Motorstromes die notwendige Induktivität der Glättungsdrossel berechnet wird. Die Kriterien für die Wahl der Konstruktion werden gestreift.

Die Serieerregung der Fahrmotoren wird mit der Gemischt -sowie der Fremderregung mit nachgebildeter Seriecharakteristik («Image serie») verglichen. Es können dadurch die verschiedenen Vorteile der Feldschwächung sowie der Erregung beim elektrodynamischen Bremsen gezeigt werden. Die Steuerung der Thyristoren wird für die Strom-, Geschwindigkeits- und Charakteristikregelung untersucht.

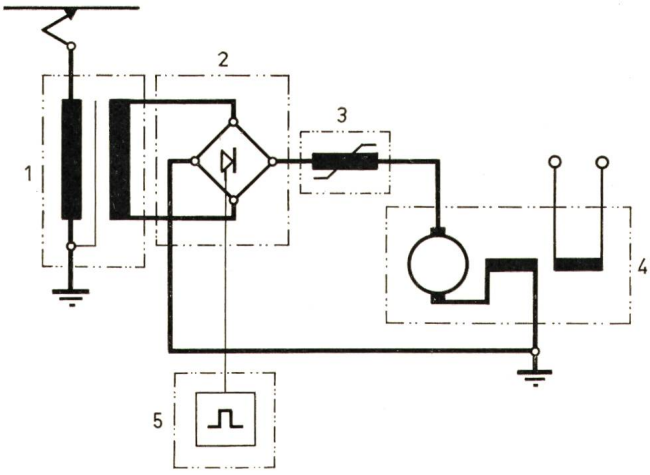


Fig. 1
Schema des Leistungskreises
1 Haupttransformator; *2* Gleichrichterblock mit Thyristoren; *3* Glättungsdrossel; *4* Zugmotor; *5* Steuergerät für die Thyristoren

Haupttransformator

Die Nennleistung des Haupttransformators ist mit einer Dauerleistung des Fahrmotors sowie der Einsatzart des Fahrzeuges eng verknüpft. Wenn das Fahrzeug grosse Steigungen in kurzen Zeiten (20 bis 40 min.) zu durchfahren hat, ist es angezeigt, die gegenüber den Fahrmotoren wesentliche grössere Zeitkonstante des Transformators zu berücksichtigen, damit der Transformator nicht überdimensioniert wird. In diesem Fall kann ein Verhältnis von 0,75 bis 0,80 zwischen der Nennleistung des Transformators und der Dauerleistung des Fahrmotors zugelassen werden. Im Gegensatz zum eben erwähnten, kann dieser Faktor bei Triebfahrzeugen die schwere Züge auf kleinen Steigungen zu befördern haben, leicht den Wert 0,9 bis 1,0 erreichen.

Wenn das Fahrzeug im Vorortsverkehr eingesetzt wird, ist es unumgänglich für die Primär- wie auch für die Sekundärwicklung ein vom Fahrdiagramm abgeleitetes Belastungsdiagramm zu erstellen. Nachfolgend soll die Ableitung der Gleichungen, die zur Nennleistung führen aufgezeigt werden.

Die klassische Gleichrichtertheorie rechnet mit einem ideal geglätteten Gleichstrom d.h. mit einer Drosselspule unendlich grosser Selbstinduktivität. Es ist zwar möglich die Stromform des Gleich- und Wechselstromes bei gegebener sinusförmiger Netzspannung und gegebener gleichstromseitiger Last sehr exakt zu berechnen und die Spannungsabfälle, verursacht durch den Transformator und Gleichrichter, genau zu erfassen; doch zeigt ein Vergleich der Rechnungen dass zur Bestimmungen der Spannungsabfälle die klassische Gleichrichtertheorie genügend genaue Werte liefert.

Die an der Sekundärwicklung des Transformators notwendige Leerlaufspannung wird für eine gegebene Leistung P_{mot} an der Welle des Fahrmotors bestimmt. Durch diese Leistung ist eine bestimmte Klemmenspannung U_{mot} und ein bestimmter Ankerstrom I_{mot} gegeben. Die Rechnung wird derart durchgeführt, dass wir vom Motor zur Sekundärwicklung der Transformatoren zurückrechnen. Ein erster Anteil des Spannungsabfalles ergibt sich am Widerstand der Glättungsdrosselspule.

Die üblichen Werte dieses Anteils bewegen sich in folgenden Grenzen:

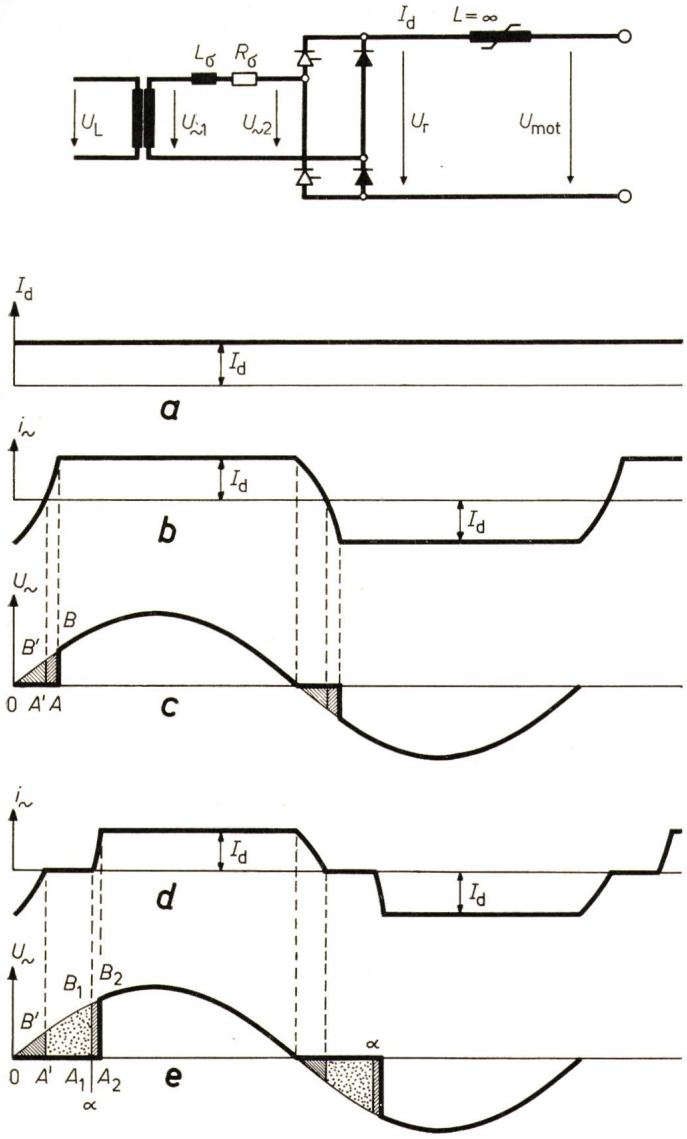


Fig. 2
Wechselspannung und -strom in einer Gleichrichterbrücke
a Gleichstrom bei $L_{\text{Glättung}} = \infty$; *b* Wechselstrom für einen ungeregelten Gleichrichter oder für einen Gleichrichter bei Maximalspannung; *c* Speisespannung mit Unterdrückung der Spannungsbrücke während der Kommutationszeit; *d* Wechselstrom für einen gesteuerten Gleichrichter mit Zündwinkel α; *e* Speisespannung mit Unterdrückung von Spannungsbereichen (Einfluss des Zündwinkels und der Kommutation)

1,5 bis 2 % bei 50 Hz

3,5 bis 4 % bei 16⅔ Hz

Bei diesen Angaben handelt es sich um Erfahrungswerte, die eine erste Schätzung erlauben, welche aber nach der genauen Berechnung der genannten Drossel überprüft werden müssen. Die obengenannten Werte zeigen, dass der Einfluss der Glättungsdrossel auf den Wirkungsgrad des Fahrzeuges nicht vernachlässigt werden darf, insbesondere bei 16⅔ Hz, wo die Spule ein gewisses Volumen aufweist.

Der Spannungsabfall im Gleichrichter ergibt sich, indem der Abfall von 1 bis 2 V pro Diode oder Thyristor mit der Anzahl der in Serie geschalteten Elemente multipliziert wird (Fig. 2).

Der Spannungsabfall im Transformator wird anhand eines Beispieles für den Fall einer asymmetrischen Brückenschaltung durchgerechnet, es bedeuten: α Zündewinkel, I_d vollkommen geglätteter Gleichstrom.

Bei Spannungsnulldurchgang müsste sich die Spannung an den Dioden umkehren, was die letzteren nicht gestatten. Alle Dioden werden leitend, und die Gleichrichterbrücke stellt sowohl für die Wechsel- wie auch für die Gleichstromseite einen Kurzschluss dar (Kommutation). Der transformatorseitige Strom fliesst noch bis zu seinem Nulldurchgang weiter und bleibt Null, sofern der gegenüberliegende Thyristor nicht gezündet ist. Bei der Zündung wächst der transformatorseitige Strom auf den Wert des Gleichstromes I_d an (die Stromrichtung im Transformator ist dabei umgekehrt). Der Transformatorstrom gehorcht dabei folgender Gleichung:

$$\hat{U} \sin \omega t - R\sigma i - L\sigma \frac{di}{dt} = 0$$

da die Gleichrichterbrücke, abgesehen von den Spannungsabfällen in den Halbleiterelementen, einen Kurzschluss darstellt. (Bedeutung der Symbole siehe Fig. 2). In der Spannungszeit Fläche werden somit zwei gleich grosse Flächen herausgeschnitten, deren Inhalt proportional zum Strom I_d ist. Da diese Flächen in der Sinuskurve der Speisespannung fehlen, stellen sie den durch die Transformatoreaktanz hervorgerufenen Spannungsabfall dar.

Die Grösse dieser Flächen ist nur stromabhängig, dagegen unabhängig vom Zündwinkel. Die Grösse dieser Flächen dividiert durch die Periodendauer T beträgt bei einphasiger Brückenschaltung und Nennstrom:

$$\triangle \text{OAB} = U_{do} \cdot U_x \frac{1}{\sqrt{2}}$$

$$\triangle \text{OA'B'} = \tfrac{1}{2}\, U_{do}\, U_x \frac{1}{\sqrt{2}}$$

oder

$$\triangle \text{OA'B'} = \triangle \text{A'A BB'} \quad \text{(Brücke voll ausgesteuert)}$$
$$= \triangle \text{A1A2B2B1} \quad \text{(Brücke geregelt)}$$

wobei U_{do} die Leerlaufgleichspannung und

U_x der induktive Anteil der Kurzschlußspannung bei Nennstrom bedeuten.

Um die Leerlaufspannung der Sekundärwicklung zu erhalten, muss dieser Spannungsabfall so wie der ohmsche Spannungsabfall in der Wicklung zur vorher gerechneten Spannung addiert werden.

Zum Schluss muss die Spannung mit dem Faktor $\pi/2\sqrt{2} = 1{,}11$, entsprechend dem Verhältnis zwischen Effektiv- und Mittelwert der Wechselspannung, multipliziert werden.

Als Beispiel soll die sekundäre Leerlaufspannung eines Transformators gerechnet werden, der über eine unsymmetrische Thyristorbrücke einen Gleichstrommotor mit folgenden Daten speisen soll:

$I_{1h} = 275$ A
$I_{konst.} = 250$ A
$U = 750$ V
$f = 16\tfrac{2}{3}$ Hz

Es sollen zwei Fälle mit verschiedenen Kurzschlußspannungen (4 und 10 %) betrachtet werden. Die Werte beziehen sich auf den Stundenstrom und die Primär-Nennspannung

U_{cc}	10 %	4 %
U_x	9,35 %	3,5 %
U_r	3,5 %	2 %
U_{mot}	750 V	750 V
Spannungsabfall in der Glättungsdrosselspule (3,8 %)	28,5 V	28,5 V

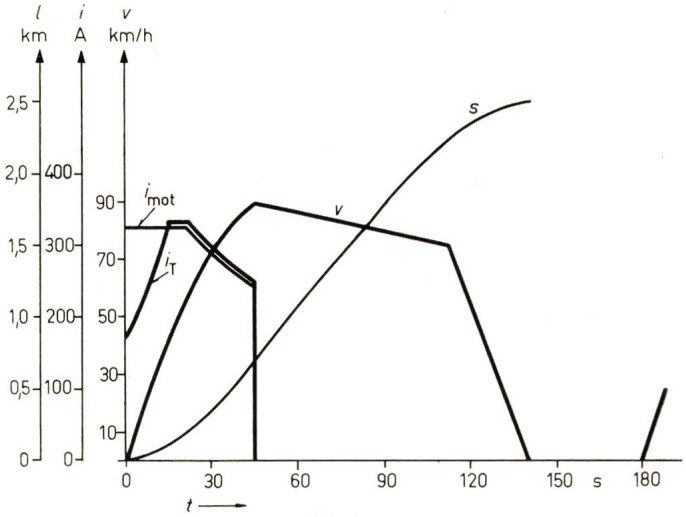


Fig. 3
Bestimmung des definierten Stromes des Transformators
i_{mot} Läuferstrom für einen Motor; i_T Strom in der Sekundärwicklung;

Gleichspannungs-Mittelwert am Gleichrichterausgang bei vollausgesteuerter Brücke	778,5 V	778,5 V
Spannungsabfall in den Halbleitern	3 V	3 V
	781,5 V	781,5 V
Induktiver Spannungsabfall 9,35 · 0,707	6,6 %	2,5 %
Ohmscher Spannungsabfall	3,5 %	2 %
	10,1 %	4,5 %
Mittelwert der Leerlaufspannung $\frac{781,5}{1-0,101}$	869 V	818 V
Effektivwert der sekundären Leerlaufspannung	= 965 V	908 V
	(106 %)	(100 %)

Für die Berechnung der Nennleistung des Transformators wird eine Linienführung mit steilen Rampen berücksichtigt (45 ‰ während einer halben Stunde). Der dreiteilige Treibwagenzug mit einem totalen Brutto-Gewicht von 86 Mp benötigt für diesen Einsatz eine Motordauerleistung von 4 × 750 V × 250 A = 750 kW. Mit einem Reduktionsfaktor von 0,85 ergibt sich folgende Nennleistung des Transformators:

4 · 250 A · 0,85 · 965 V = 820 kVA (Fall mit hoher Kurzschlußspannung von 10 %)
4 · 250 A · 0,85 · 908 V = 770 kVA (Fall mit niedriger Kurzschlussspannung von 4 %).

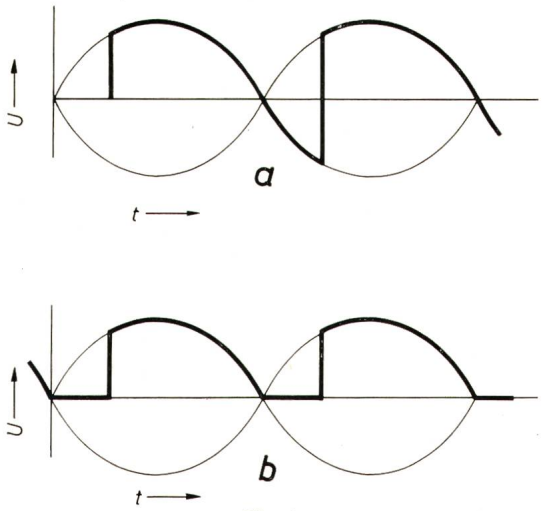


Fig. 4
Vergleich bei Kurvenformen der gleichgerichteten Spannung einer ganzgesteuerten und einer halbgesteuerten Brücke
U Spannung; *t* Zeit

Überprüfen wir noch den Einsatz des genannten Triebwagenzuges von 86 Mp Gesamtgewicht im Vorortsverkehr mit einer mittleren Stationsdistanz von 2500 m. Fig. 3 zeigt den quadratischen Mittelwert des Stromes der Sekundärwicklung. Dieser beträgt 150 A und ist somit wesentlich kleiner als der auf den Steigungen auftretende Wert. Wenn der Triebwagenzug mit einer Rekuperationsbremse ausgerüstet wäre, würde der quadratische Mittelwert des Stromes erheblich ansteigen.

Die Suche nach einer kleinen Nennleistung und einem kleinen Gewicht erklärt die Wahl einer möglichst niedrigen Kurzschlußspannung. Eine niedrige Kurzschlußspannung wirkt sich im weiteren günstig auf die Zugkraft-Geschwindigkeitscharakteristik des Fahrzeuges aus (flache Charakteristik mit verminderter Schleudertendenz). Jedoch ergibt eine niedrige Kurzschlußspannung einen großen Kurzschlußstrom, was eine grössere Anzahl Thyristoren bedingt.

Mit der Wahl einer höheren Kurzschlußspannung erhalten wir einen Gleichrichter mit kleinem Volumen und einem einfachen Schutz (keine Sicherungen). Die Schleudertendenz, die eine stärker geneigte Zugkraft-Geschwindigkeitscharakteristik bewirkt, kann durch die Anwendung eines fremd- oder gemischterregten Motors verkleinert werden.

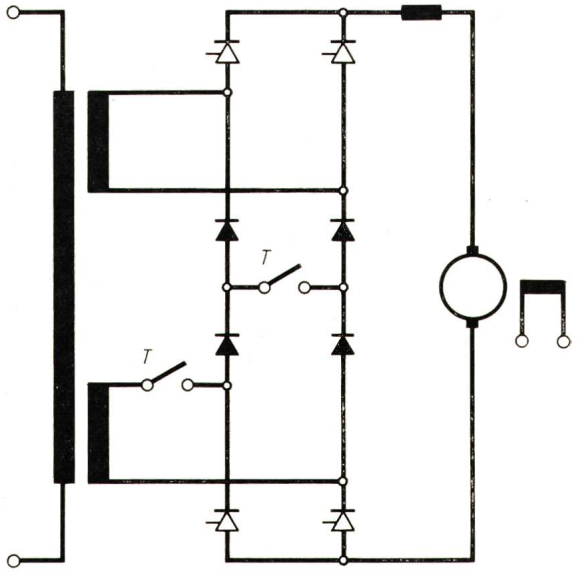


Fig. 5
Anwendungsschema zweier symmetrischen Brücken für Rekuperations-Bremsung
T Schalter — geschlossen bei Betriebsart «Antrieb»
offen bei Betriebsart «Bremsung» (½ Leistung)

Bei der gesamten Berechnung handelt es sich um ein Optimalisierungsproblem der Einheit Transformator-Gleichrichter. Diese Optimalisierung muss vorerst unter dem Gesichtspunkt des Preises und hierauf unter demjenigen des Gewichtes durchgeführt werden.

Um in Anbetracht der heute in den modernen Triebfahrzeugen eingebauten grossen Leistungen ein mit der maximalen Achstlast vereinbares Transformatorgewicht zu erhalten, ist es praktisch unumgänglich, eine Fremdkühlung des Transformators anzuwenden.

Gleichrichter

Im Vergleich zu der grossen Anzahl möglicher Schaltungen für einen Thyristor-Gleichrichter, werden nur eine beschränkte

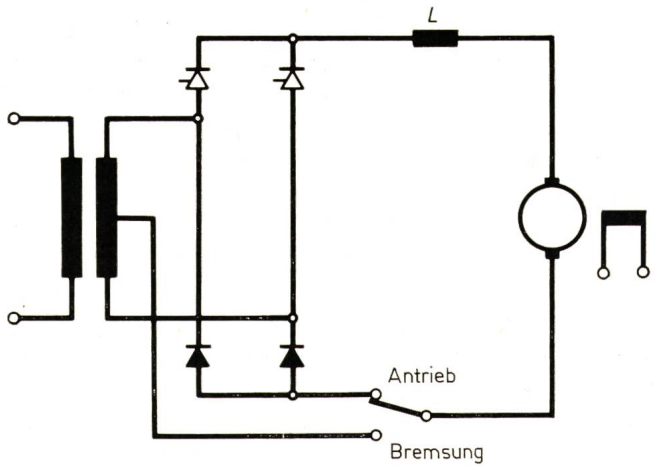
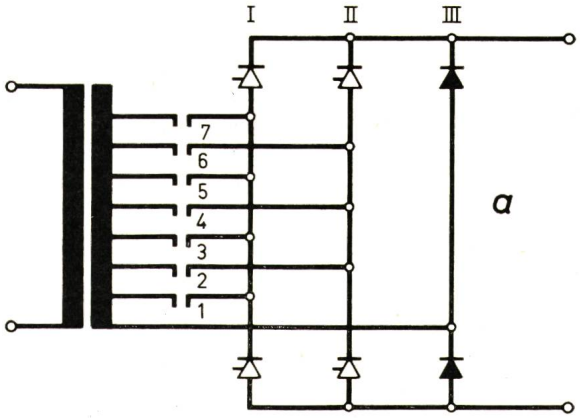


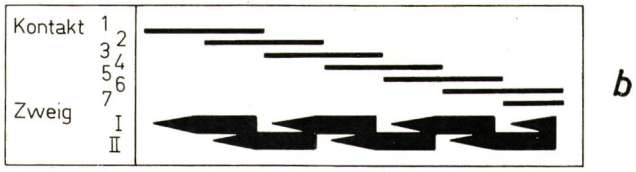
Fig. 6
Anwendungsschema einer symmetrischen Brücke für die Rekuperations-Bremsung

Zahl Schaltungen angewandt, welche bereits in andern Vorträgen behandelt wurden. Fassen wir kurz die quantitativen Gründe die zur Wahl einer bestimmten Schaltung führen, zusammen.

Die zur Zeit des Quecksilberdampf-Gleichrichters häufig angewandte Mittelpunktschaltung wurde für die Halbleitergleichrichter verlassen, da sie zu einer Überdimensionierung des Transormators führt.

Eine Brückenschaltung bestehend aus 4 Thyristorzweigen wird nur verwendet, wenn mit der in Fahrbetrieb möglichen vollen Leistung ein Nutzbetrieb erreicht werden soll. Für Steuerwinkel $\alpha > 0$ sind die Flächen unterhalb der Nullinie, im Gegensatz zur asymmetrischen Brücke (Fig. 4), an der Gleichspannungsbildung beteiligt, so dass eine grössere Spannungs-Welligkeit zu erwarten ist, was wiederum zu einer Glättungsdrossel mit grosser Induktivität führt. Gegenüber der halbgesteuerten Brücke ergeben sich aber auch Vorteile, so ist einerseits ein kleinerer Oberwellengehalt des Primärstromes zu erwarten, anderseits erlauben die vollgesteuerten Brücken eines einfachen Übergangs auf Nutzbremsung, indem mit einem Steuerwinkel $\alpha > 90^0$ gearbeitet wird. Die symmetrische Brücke bietet schaltungstechnische Vorteile, wenn eine Nutzbremse mit der halben Traktionsleistung eingebaut werden soll, oder wenn zwei Brücken in Serie geschaltet werden, um den Leistungsfaktor und den Oberwellengehalt des Primärstromes zu vermindern. Fig. 5 zeigt das Schaltbild dieser Anwendungsart-In Fig. 6 ist das Schaltbild einer symmetrischen Brücke, die





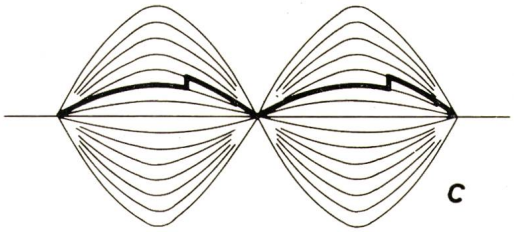


Fig. 8
Beispiel eines Schemas zur Unterleistung der geregelten Sekundärspannung
a Schema
b Programm
c Übergang von Stufe 2 auf Stufe 3

einen Nutzbremsbetrieb mit halber Traktionsleistung erlaubt, dargestellt (Übergang auf Mittelpunktschaltung).

Die praktisch am meisten verwendete asymmetrische Brücke zeigt äusserlich die gleichen Charakteristiken wie eine symmetrische Brückenschaltung. In Wirklichkeit ist es möglich, die Anzahl der Thyristoren gegenüber derjenigen einer symmetrischen Brücke zu reduzieren (Fig. 7), da es aus Gründen der Adhäsions-Ausrüstung zulässig oder sogar erforderlich ist, den Anfahrstrom bei höheren Geschwindigkeiten zu reduzieren. Wie ebenfalls aus der Fig. 7 ersichtlich ist, führen die Dioden bei kleinen Geschwindigkeiten den maximalen Strom (während der Zeit, die $360^0 - \alpha$ entspricht), währenddem die

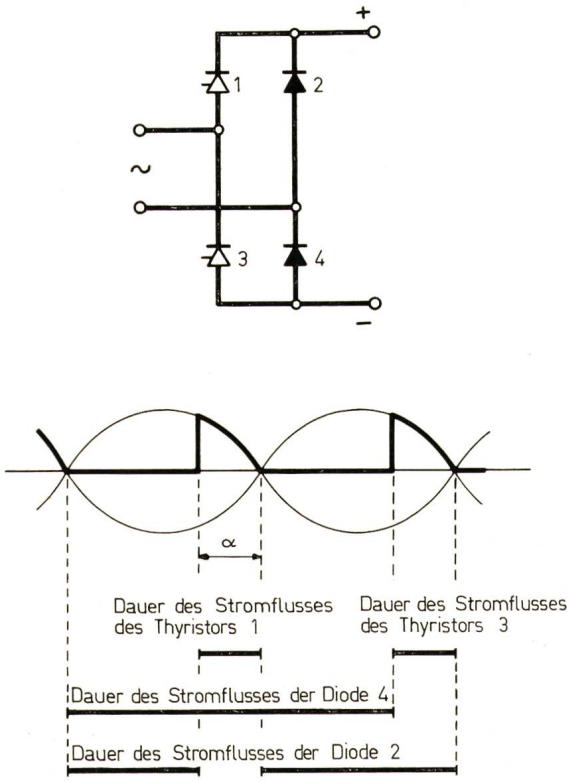


Fig. 7
Belastung der Dioden und Thyristoren einer asymmetrischen Brücke

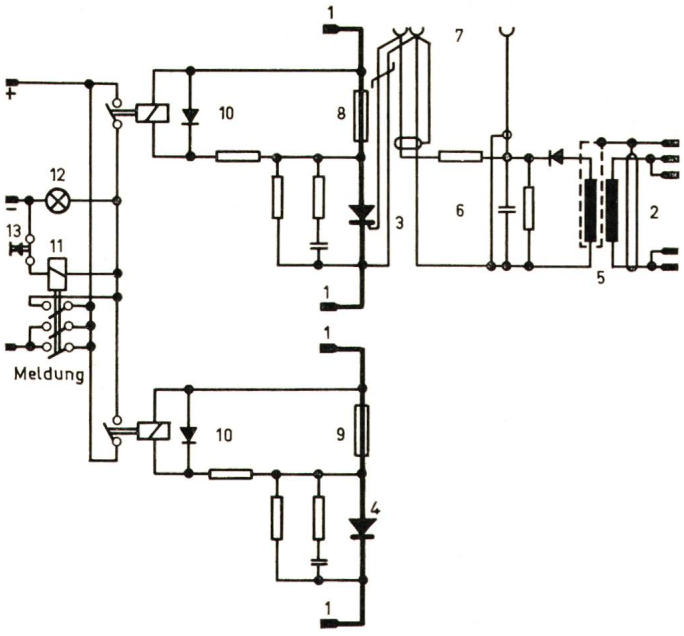


Fig. 9
Beispiel einer Schutzschaltung für Dioden und Thyristoren

Thyristoren nur während einer Zeit entsprechend dem Winkel α den Strom führen.

Wenn die Leistung eines Triebfahrzeuges die Grössenordnung von 1000 PS übersteigt, ist es notwendig zur Verbesserung des Leistungsfaktors sowie zur Verminderung des Oberwellengehaltes des Primärstromes, mehrere Brücken in Serie zu schalten. Die in Fig. 8 gezeigte Lösung erlaubt es, mit einer, gegenüber den klassischen Schaltungen mit mehreren Brücken in Serie, wesentlich verminderten Anzahl Halbleiter auszukommen. Die im Schema eingezeichneten Kontakte sind keiner wiederkehrenden Spannung unterworfen und benötigen daher weder eine Funkenlöschkammer noch eine Blasspule. Von der Primärseite her gesehen weist das Fahrzeug die Charakteristik eines Thyristorfahrzeuges mit sieben in Serie geschalteten Brücken auf. Die Wirkungsweise dieser Schaltung ist die folgende:

Die Anfahrt beginnt mit dem Schliessen des Kontaktes 1. Die Zweige I und III des Gleichrichters bilden eine halbgesteuert asymmetrische Brücke. Wenn die Brücke komplett ausgesteuert ist (1/7 der Spannung), wird der Kontakt 2 geschlossen. Der Zweig II ist nun dem Zweig I überlagert, was den gleichen Effekt ergibt wie zwei in Serie geschaltete Brükken. Wenn die Brücke des Zweiges II ganz «offen» ist, entlastet sie den Zweig I, der nun ohne Strom und ohne Spannung auf den Kontakt 3 umgeschaltet werden kann, womit die Anfahrt in der eben beschriebenen Art und Weise weitergehen kann.

Im Anhang werden einige Beispiele ausgeführter Thyristoren und Dioden europäischer Firmen gezeigt. Die Wahl der Anzahl in Serie und parallel zu schaltender Elemente hängt vom angewandten Schutzsystem ab. Der Schutz wird entweder mit speziellen flinken Sicherungen (siehe Schema Fig. 9) oder durch Auslösen des Hauptschalters erreicht. Im letzten Fall muss mit einer Dauer des Kurzschlusses in der Grössenordnung von 60 bis 80 ms (bei 16⅔ Hz) gerechnet werden, wobei die Amplitude des Stromes durch die Streuinduktivität des Transformators (ca. 10 %) begrenzt werden muss, wenn eine kostspielige Überdimensionierung des Gleichrichters vermieden werden soll.

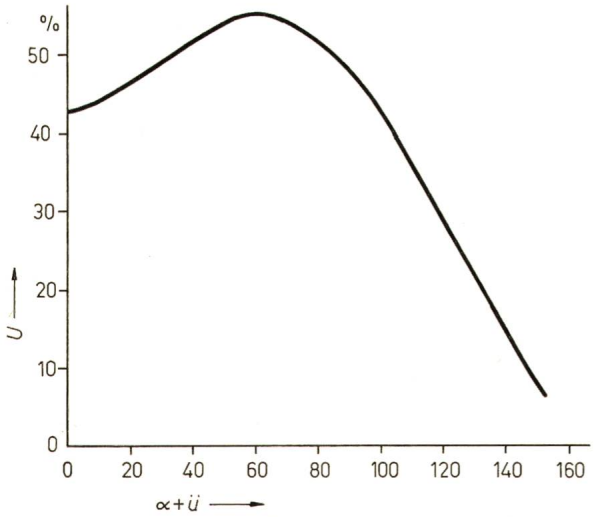


Fig. 10
Amplitude der 2. Harmonischen der gleichgerichteten Spannung in Funktion der Summe der Kommutations- und Steuerwinkel
U Wechselspannung nach dem Gleichrichter (Effektivwert)

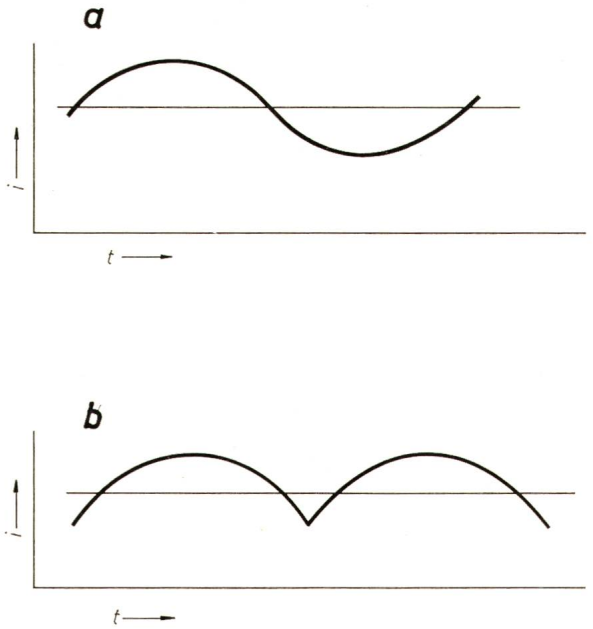


Fig. 11
Formen des gleichrichter Stromes
a idealisierter gleichrichter Strom unter alleiniger Berücksichtigung der 2. Harmonischen
b gleichrichter Strom in Wirklichkeit

Glättungsdrosselspule

Die Wechselstrom-Komponente des durch die Fahrmotoren fliessenden Stromes muss durch eine Glättungsdrosselspule begrenzt werden. Die Induktivität dieser Drossel soll derart berechnet sein, dass der Spitzenwert der Stromwelligkeit im Bereich des Stundenbetriebes 25 bis 35 % beträgt. Der Gleichrichter liefert auf seiner Gleichstromseite eine Spannung, die sich in einen Gleichspannungsanteil und die Anteile der geradzahligen Harmonischen aufteilen lässt. Die wichtigste Harmonische der Spannung ist diejenige mit der doppelten Netzfrequenz (2. Harmonische). Fig. 10 zeigt die Amplitude dieser Harmonischen in Funktion des Winkels $\alpha + \ddot{u}$ (Zünd- und Überlappungswinkel).

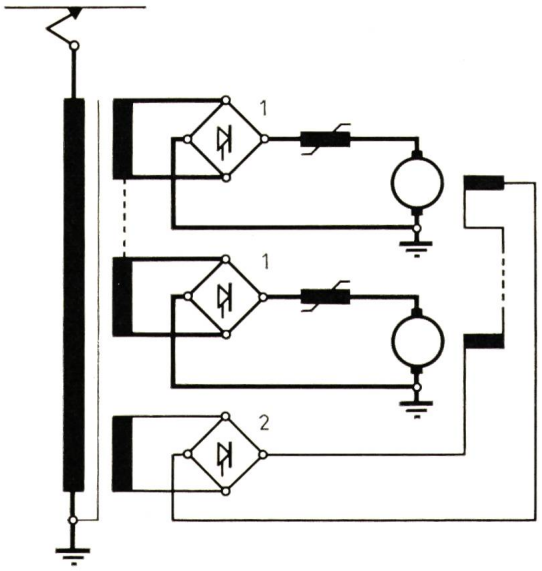


Fig. 12
Speisung und Steuerung der Erregung eines Traktionsmotors mit separater Erregung
1 Hauptbrücke; *2* Erregerbrücke

Wenn, in erster Näherung, nur die zweite Harmonische der Spannung berücksichtigt wird, kann folgender Momentanwert der Spannung definiert werden:

$$u = U_c + U_a \sqrt{2} \sin 2\omega t$$

wobei U_c = Gleichspannungskomponente
U_a = Wechselspannung der 2. Harmonischen
ω = Kreisfrequenz des Primärnetzes

Für den Stromkreis der Glättungsdrosselspule gilt folgende Gleichung:

$$E_{mot} + R_i + L \frac{di}{dt} = U = U_c + U_a \sqrt{2} \sin 2\omega t$$

wobei E_{mot} induzierte Spannung im Fahrmotor
R, L Widerstand bzw. Induktivität des ganzen Kreises (Glättungsdrossel + Fahrmotor)

Indem E_{mot} für die Wechselspannungskomponenten als Kurzschluss angenommen wird, erhält letztere folgenden Wert:

$$I_a = \frac{U_a}{\sqrt{R^2 + (2\omega)^2 L^2}} = \frac{U_a}{2\omega L} = \frac{O_i I_c}{\sqrt{2}}$$

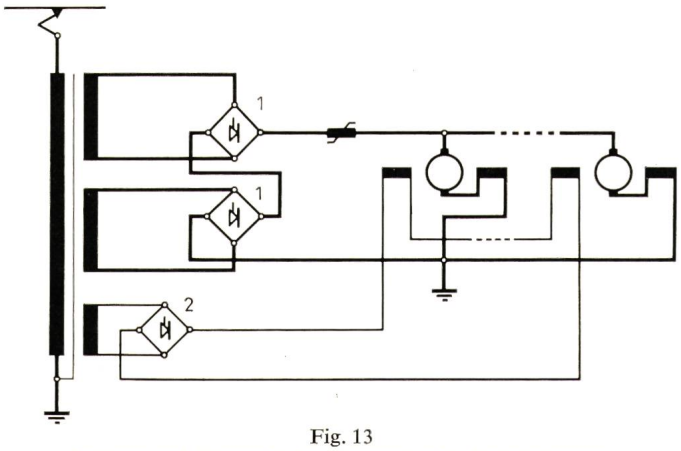


Fig. 13
Speisung und Steuerung der Erregung eines Traktionsmotors in Compoundschaltung
1 Hauptbrücke; *2* Erregerbrücke

die Welligkeit des Stromes wird dabei wie folgt definiert:

$$O_i = \frac{I_{max} - I_{min}}{I_{max} + I_{min}} = \sqrt{2} \frac{I_a}{I_c}$$

Für eine gegebene Stromwelligkeit erhalten wir die nachstehende totale Induktivität (Glättungsdrossel + Fahrmotor)

$$L = \frac{1}{2\omega} \cdot \frac{U_a}{L_a} = \frac{1}{2\omega} \cdot \frac{U_a \sqrt{2}}{O_i I_c}$$

U_a ist für den Fall einer halbgesteuerten Brücke in Fig. 10 dargestellt.

Die mit der vorerwähnten Gleichung berechneten Induktivität genügt nicht, um den gleichgerichteten Strom auf den gewünschten Wert zu glätten. Fig. 11 zeigt den Unterschied zwischen der Stromform bei der nur die 2. Harmonie berücksichtigt ist und derjenigen, die in Wirklichkeit vorhanden ist.

Es ist möglich, annäherungsweise die benötigte Induktivität zu berechnen, indem der durch die obenstehende Formel erhaltene Wert um 45 % erhöht wird. Dieses Resultat genügt bei der Erstellung eines Projektes, vor allem wenn man sich auf vorhandene Ausführungen stützen kann und eine relativ komplexe Rechnung umgangen werden soll.

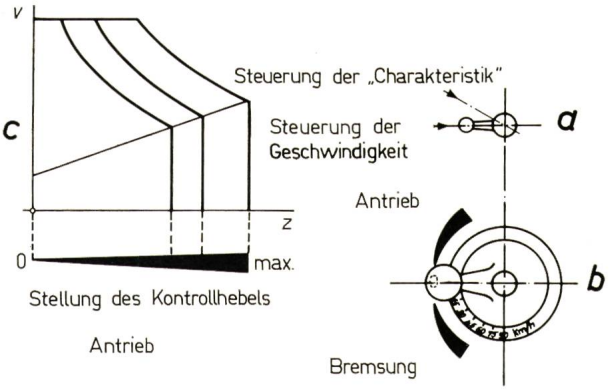


Fig. 14
Steuerung der «Charakteristik»
a Umschalter ↗ Steuerung der Charakteristik ↘ Steuerung der Geschwindigkeit
b Steuerung der Geschwindigkeit respektiv der Charakteristik
c Charakteristiken

Je nach den bei der Konzeption eines Triebfahrzeuges am meisten ins Gewicht fallenden Kriterien, werden von den Konstrukteuren verschiedene Bauarten angewandt. Wenn es das Gewicht erlaubt, kann die Drossel mit Öl gekühlt und im Transformator-Kessel untergebracht werden. Muss aber unter allen Umständen Gewicht gespart werden, wird die Drosselspule in einem Luftkanal untergebracht und durch Luft fremdgekühlt.

Die Kennlinie der Induktivität in Funktion des mittleren gleichgerichteten Stromes (Vormagnetisierungsstrom) sollte einen hyperbolischen Verlauf haben, damit die Welligkeit konstant bleibt. In diesem Fall darf die Wechselstromkomponente tatsächlich proportinal zum Motorstrom ändern, währenddem die Sekundärspannung ungefähr konstant bleibt. Da jedoch die für einen Fahrmotor bei den verschiedenen Betriebspunkten zulässige Welligkeit von Motor zu Motor ver-

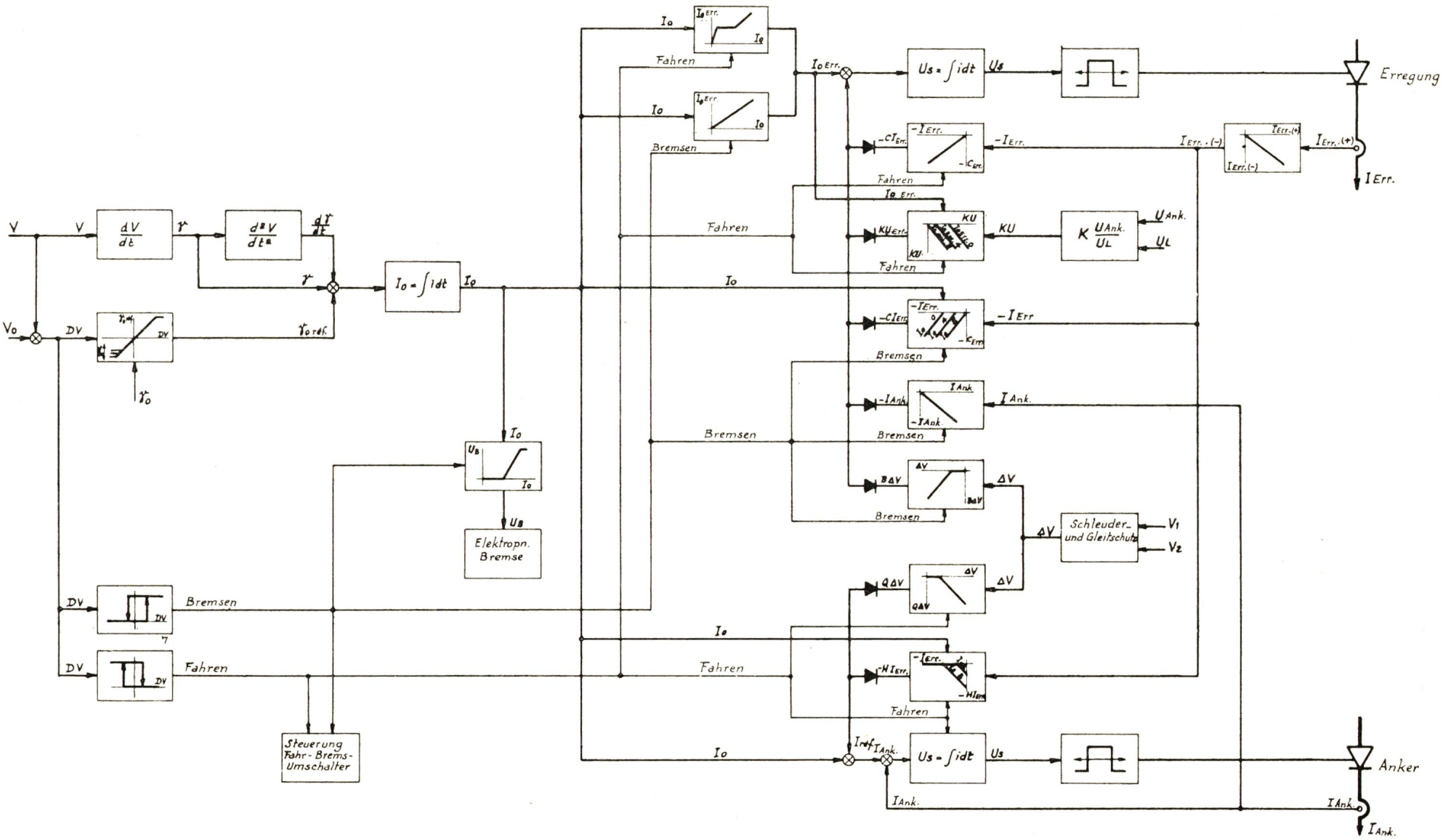


Fig. 15

Blockschema der elektronischen Steuerung der Geschwindigkeit für Triebwagen der rhätischen Bahn

v tatsächliche Geschwindigkeit; v_0 eingestellte Geschwindigkeit; γ_0 eingestellte Beschleunigung; v_1 Geschwindigkeit der Triebachse 1; v_2 Geschwindigkeit der Triebachse 2; U_{ind} Spannung am Motor; U_L Fahrdrahtspannung

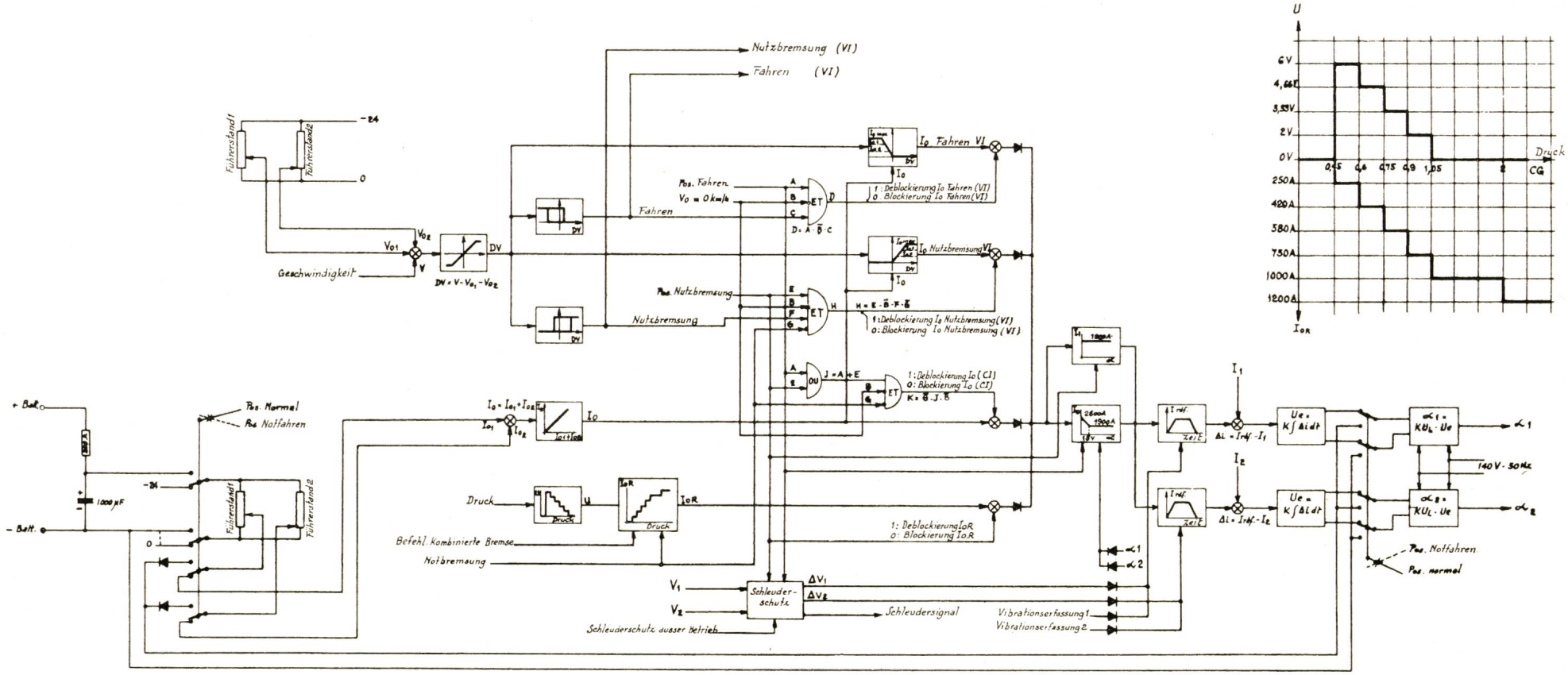


Fig. 16
Blockschema des Geschwindigkeitsreglers und des Stromes einer BB Lokomotive mit Thyristoren
CI angezeigter Strom
VI angezeigte Geschwindigkeit

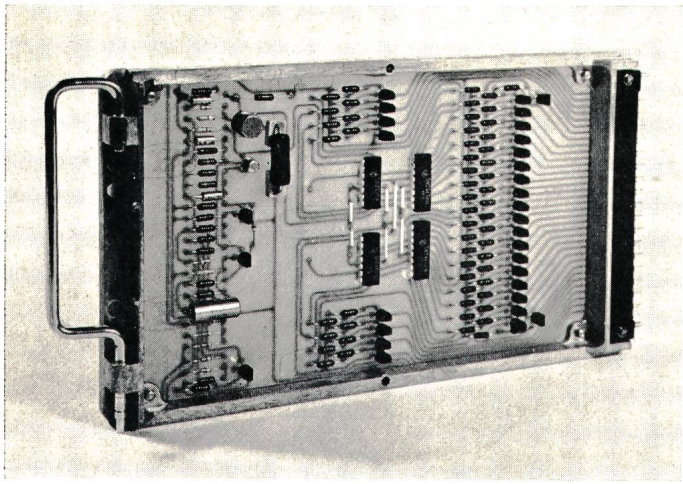


Fig. 17
Steckkarte der Steuerelektronik mit integrierter Schaltung

schieden ist, können sich Abweichungen vom hyperbolischen Verlauf der Kennlinie ergeben.

Erregerschaltung der Fahrmotoren

Die bei den meisten Gleichstrom- und Diodengleichrichterfahrzeugen angewandte Schaltung besteht in der Serieerregung der Motoren. Die Feldschwächung erfolgt dabei durch Schützen und Widerstände.

Auf einem Thyristorfahrzeug, das eine stufenlose Einstellung der Zugkraft und der Geschwindigkeit erlaubt, ist es unerwünscht, eine Apparatur einzubauen, die stufenweise arbeitet und zudem eines periodischen Unterhaltes bedarf. Im weiteren kann sich eine grosse Anzahl Schützen ergeben, wenn aus Gründen eines kleinen Transformator-Nennleistung mit grosser Feldschwächung gerechnet wird. So müssen z. B. bei einem Fahrzeug mit 4 parallel geschalteten Motoren, die eine Feldschwächung von 60 % ($I_{exc}/I_{Anker} = 0{,}4$) aufweisen, eine Batterie von 16 Schützen vorgesehen werden. Diese Batterie kann durch eine Halbleitereinrichtung mit viel kleinerem Volumen ersetzt werden.

Wenn die Serie-Erregung beibehalten wird, kann eine kontinuierliche Feldschwächung mittels eines Gleichstromstellers

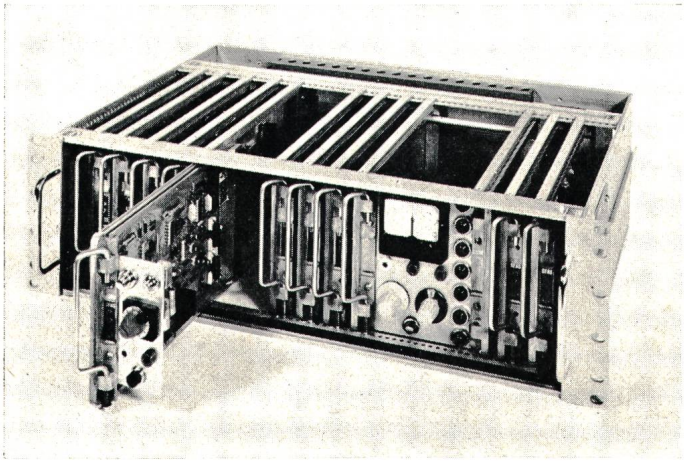


Fig. 18
Steuereinschub mit Geschwindigkeitssteuerung für Thyristor-Fahrzeuge

pro Motor erreicht werden. Da die Kosten einer solchen Einrichtung relativ gross sind, werden andere Lösungen gesucht, wovon nachstehend zwei praktisch ausgeführte Beispiele beschrieben sind.

Die erste Lösung besteht darin, einen komplett fremderregten Motor zu verwenden. Fig. 12 zeigt das Prinzipschema der Triebwagen der Rhätischen Bahn. Die gewählte «Block»-Schaltung von Motor und Gleichrichter ergibt die grösste Sicherheit im Pannenfalle einer Gruppe und erlaubt es gleichzeitig nur eine einzige Erregerbrücke zu verwenden. Die gleichmässige Lastaufteilung auf die Fahrmotoren wird durch die individuelle Regelbarkeit jedes Ankerstromes gewährleistet. Dieses Schema kann angewandt werden, wenn die Leistung nicht zu gross ist (1000 PS in diesem Fall), und wenn zur Begrenzung der Blindleistung oder des Oberwellengehaltes des Primärstromes nicht mehrere Brücken in Serie geschaltet werden müssen. Die eine kleine Leistung aufweisende Erreger-

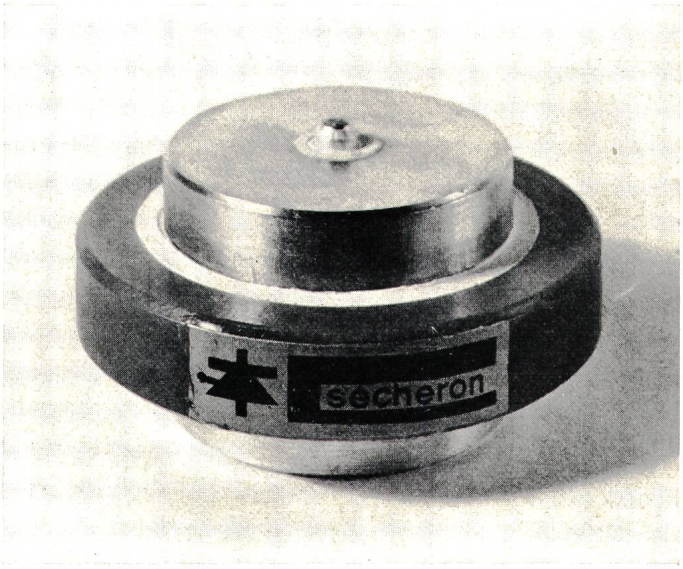


Fig. 19
Scheibenthyristor mit Luftkühlung

brücke wird ebenfalls für die elektrodynamische Bremse (Widerstands- oder Nutzstrombremse) verwendet. Die Steuerung der Erregerbrücke kann nach dem System der «nachgebildeten Seriecharakteristik» (Image série) erfolgen, wobei der Erregerstrom dem Ankerstrom proportional ist. Die kontinuierliche Feldschwächung erreicht man durch sukzessives Verändern des Proportionalitätsfaktors. Ein entsprechendes System wird im nachfolgenden Kapitel beschrieben. Sobald die Leistung des Triebfahrzeuges grösser wird und mehrere Brücken in Serie vorgesehen werden müssen, wird die obengenannte Lösung zu kostspielig, da sie, um eine gleichmässige Lastverteilung unter den Motoren zu gewährleisten, zuviele Brücken benötigt, sei es im Anker- oder im Erregerkreis (eine pro Motor). In diesem Fall ist es angezeigt, Motoren mit gemischter Erregung zu verwenden, deren Serie-Wicklung die Lastverteilung bewirkt und die gegebenenfalls im Nutzbremsbetrieb als Schutzeinrichtung gegen Überströme, hervorgerufen durch das Kippen der als Wechselrichter arbeitenden Stromrichters, dienen kann.

Für die Erregung genügt eine einzige Erregerbrücke, die nach dem Prinzip der «nachgebildeten Seriecharakteristik» gesteuert wird, wobei ebenfalls eine kontinuierliche Feldschwächung möglich ist.

Elektronische Steuerung

Auf den Thyristorfahrzeugen findet die halbautomatische elektronische Steuerung ihre breiteste Anwendung. Insbesondere erlaubt die kontinuierliche Regelung, die für die Zündwinkelverschiebung notwendig ist, eine Geschwindigkeitsregelung mit grosser Genauigkeit ohne dass eine elektromechanische

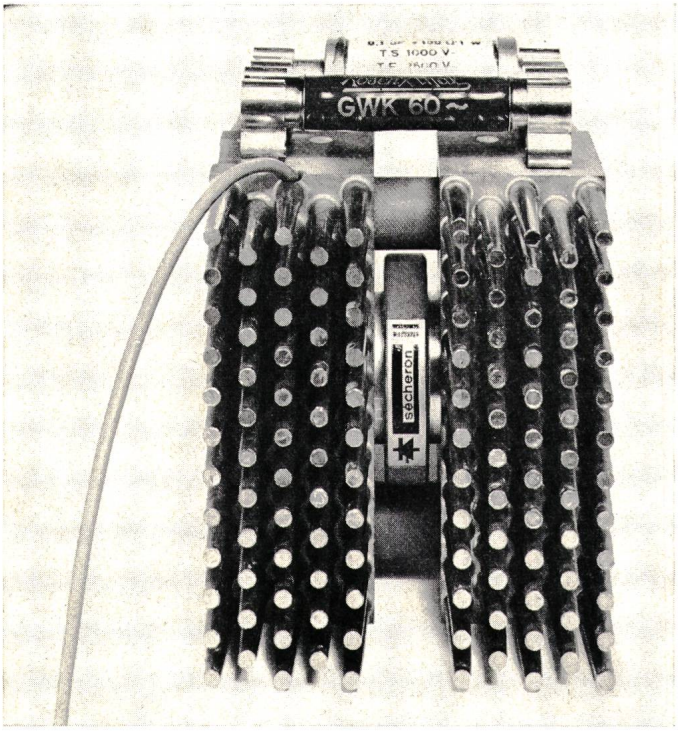


Fig. 20
Scheibenthyristor zwischen zwei Kühlköpfen von Typ «Herisson» montiert

Apparatur unter Last zahlreiche Schaltbewegungen ausführen muss.

Es können zwei verschiedene Systeme angewandt werden, die sich in gewissen Fällen gleichzeitig auf einem Fahrzeug einbauen lassen, wobei der Lokomotivführer je nach Art des zu führenden Zuges die eine oder andere Steuerungsart wählt (Fig. 14). Es handelt sich um die bewährte und auf vielen Fahrzeugen eingesetzte Geschwindigkeitsregelung und die sogenannte «Charakteristik-Steuerung», die eine Stromregelung bei niedrigen Geschwindigkeiten mit einer Spannungsregelung oberhalb einer dem Strom proportionalen Geschwindigkeit kombiniert (siehe Diagramm Fig. 14). Die «Charakteristik-Steuerung» erlaubt das Anfahren schwerer Züge bei schwierigen Adhäsionsverhältnissen, da ein guter Lokomotivführer durch die stufenlose Vorgabe des Motorstromes die Zugkraft genau den Verhältnissen anpassen kann.

Fig. 15 zeigt ein Beispiel eines Blockschaltbildes einer elektronischen Steuerung mit Geschwindigkeitsregelung. Das Fahrzeug weist dabei Fahrmotoren mit Fremderregung und eine Widerstandsbremse auf.

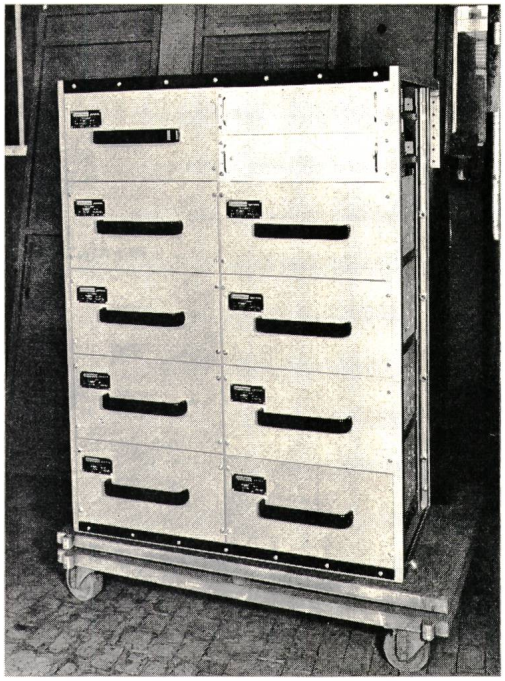


Fig. 21
Vollständiger Gleichrichter eines Triebwagens BB 1000 der rhätischen Bahnen (Schweiz)
Enthaltend 4 unsymmetrische halbgesteuerte Brücken für die Läuferspeisung (2 Schubladen pro Läufer) und einer Erregerbrücke für die 4 Ständerwicklungen

Als Vergleich ist in Fig. 16 das Blockschaltbild einer elektronischen Steuerung mit Geschwindigkeitsregelung und vorwählbarem Motorstrom durch den Lokomotivführer dargestellt. Die Lokomotive weist serieerregte Fahrmotoren und eine Nutzstrombremse auf.

Fig. 17 stellt einen mit integrierten Schaltkreisen bestückten Print dar, welche, wie aus Fig. 18 ersichtlich ist, in einem 19″-

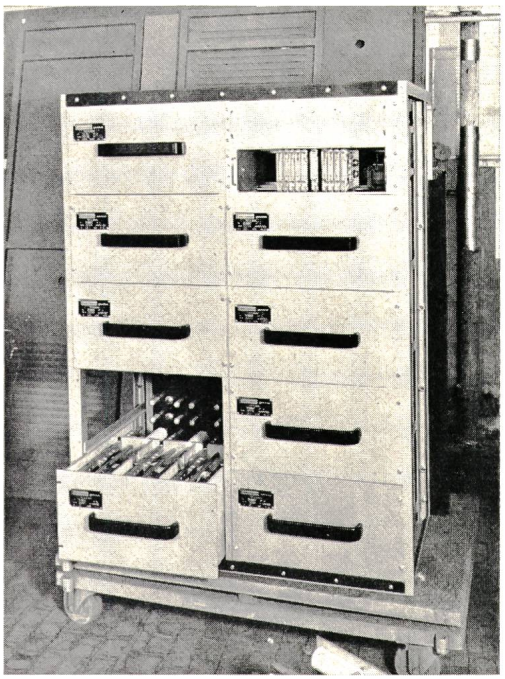


Fig. 22
Gleichrichter der Fig. 21 mit geöffnetem Einschub
Oben rechts die Steuerelektronik der Tore

Einschub zu einem Geschwindigkeitsregler für ein Thyristorfahrzeug zusammengefasst werden.

Anhang

Kenndaten einiger Thyristoren und Thyristorgleichrichter

1. Triebwagen Bo'Bo' 1000 PS der Rhätischen Bahn (Schweiz)
Fig. 19 und 20

Scheiben-Thyristor mit Luftkühlung (3m/s)

Nennspannung (Spitzenwert)	1500 V
Transitorische Sperrspannung	2750 V
Nennstrom (Mittelwert)	230 A
Spannungsabfall (bei 230 A)	0,95 V

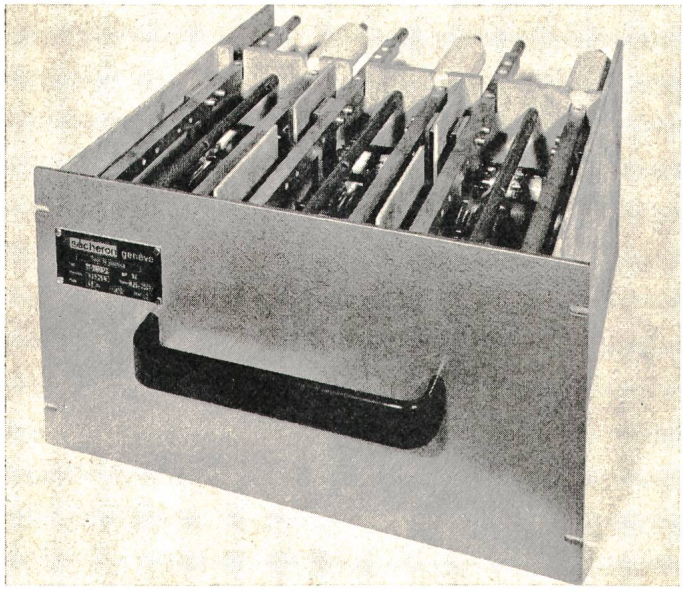


Fig. 23
Einschub der Fig. 21, enthaltend 3 Thyristoren und 3 Dioden

Der Gleichrichter (Fig. 21 und 22) enthält pro Motor eine asymmetrische halbgesteuerte Brücke und eine Erregerbrücke für die Erregung der 4 Fahrmotoren (9 Einschübe Fig. 23 und 24

Nenndaten des Motors	750 V, 275 A (lh) 450 A (Anfahrt)
Anzahl Thyristoren	24
Anzahl Dioden (2500 V, 260 A)	24
Gewicht des Gleichrichters	540 kg

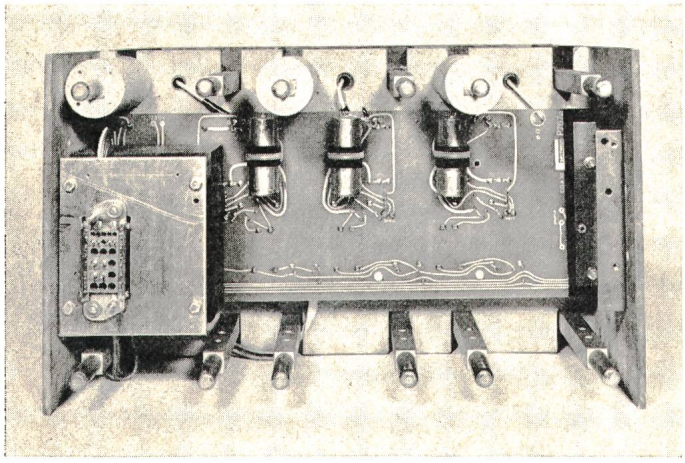


Fig. 24
Rückseite des Einschubs der Fig. 23
Links unten der Impulstransformator

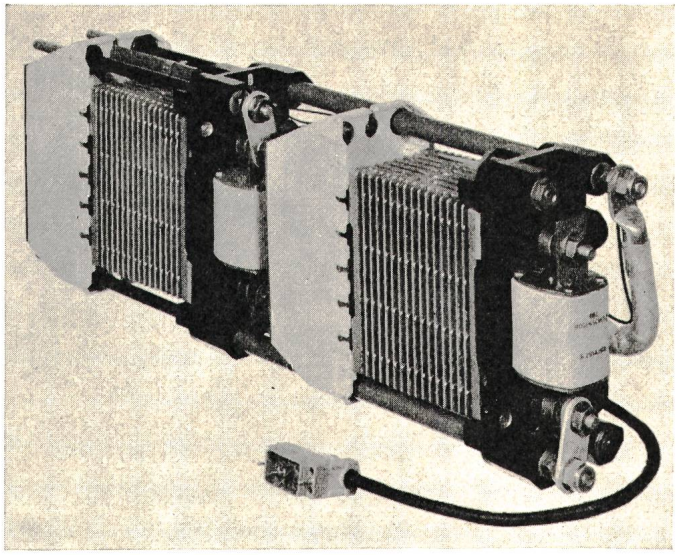


Fig. 25
Ansicht eines Thyristors und einer Diode (beide luftgekühlt), zusammen mit flinken Schutzsicherungen montiert
Aus solchen Elementen sind die Gleichrichterbrücken der Triebwagenzüge ET 420 der Deutschen Bundesbahn aufgebaut

2. Lokomotiven Rc_2 und Rc_8 der Schwedischen Staatsbahnen

Ölgekühlter Thyristor (Fig. 26)

Maximale Sperrspannung	1660 V
Nennstrom	285 A

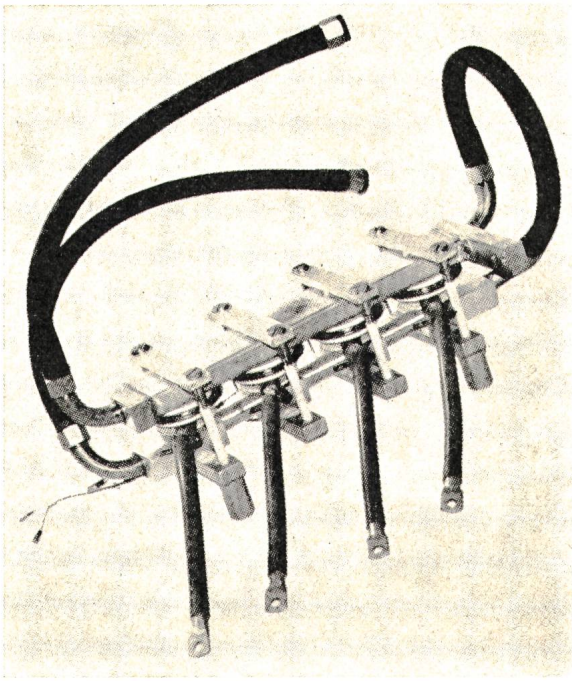


Fig. 26
Zusammenbau ölgekühlter Thyristoren

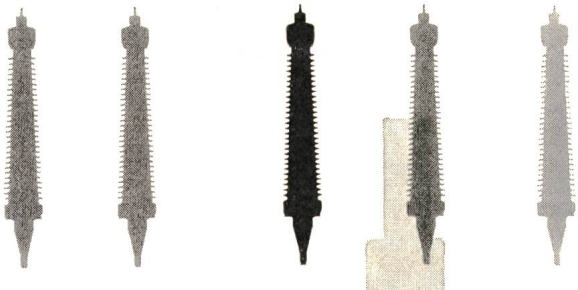
Der Gleichrichter enthält 2 asymmetrische halbgesteuerte Brükken in Serie und je 4 Brücken parallel, die die 4 Fahrmotoren speisen. Es ist ein zusätzlicher Filter zur Verbesserung des Leistungsfaktors sowie zur Dämpfung der Harmonischen eingebaut.

Nenndaten des Motors	770 V, 1250 A (lh)
Anzahl Thyristoren	$2 \cdot 4 \cdot 4 \cdot 2 = 64$
Anzahl Dioden	$2 \cdot 4 \cdot 5 \cdot 2 = 80$

Adresse des Autors:
R. Germanier und *H. Hintze*, S. A. des Ateliers de Sécheron, 1211 Genève 21.

500 x 420 kV

Transformator-Durchführungen



lieferten wir in alle fünf Erdteile, in tropische und arktische Zonen.

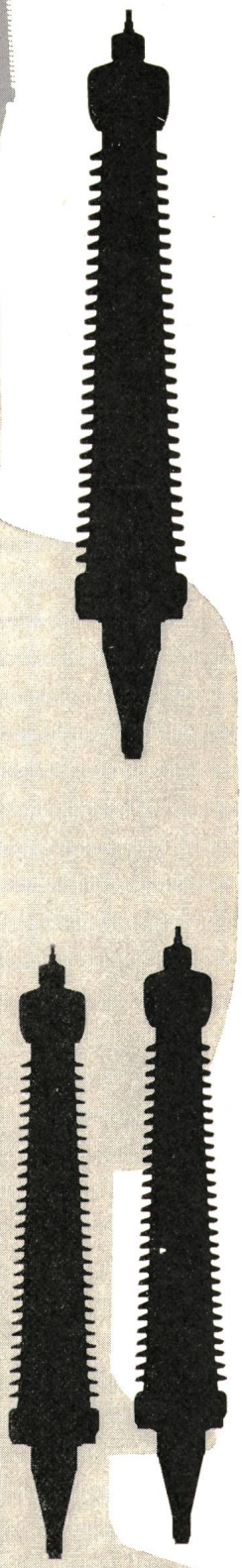
Auch 750 kV- und 1050 kV-Durchführungen wurden bereits vor Jahren mit Erfolg in Höchstleistungstransformatoren eingebaut.

Der grösste je gebaute Transformator der Welt (1300 MVA, 330 kV) wird mit Micafil-Durchführungen ausgerüstet.

Bei der Herstellung der Durchführungsisolierkörper wenden wir sowohl die Hartpapier-, als auch die Weichpapier-Technik an.

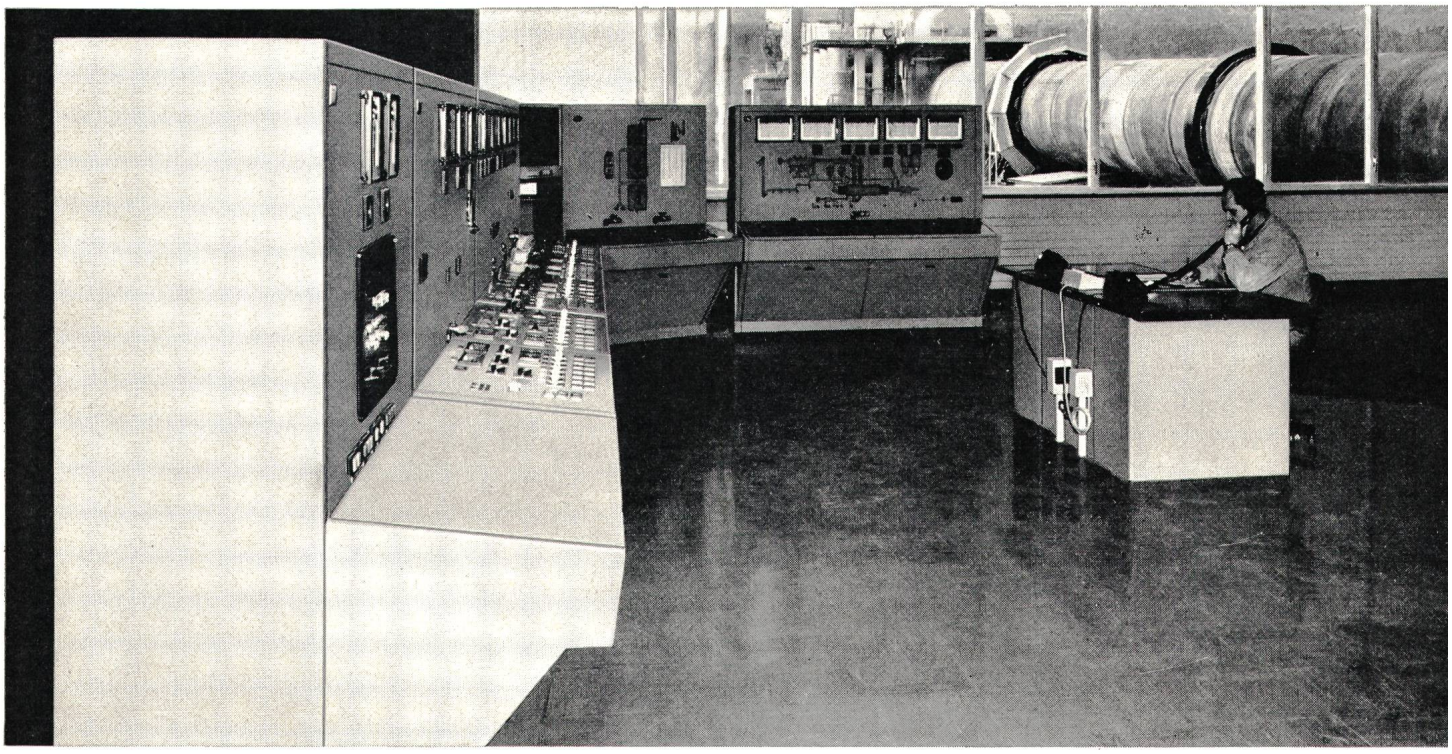
Ausser Transformator-Durchführungen bis 1050 kV Betriebsspannung oder 20'000 A Nennstrom liefern wir Generator- und Wanddurchführungen jeder Leistungsgrösse. In den letzten 50 Jahren waren es im ganzen über 380'000 Stück!

Bei allen Durchführungsproblemen stehen Ihnen unsere Ingenieure gerne zur Verfügung. Auf Wunsch stellen wir Ihnen ausführliche Unterlagen zu. Verlangen Sie die Dokumentation X 132.

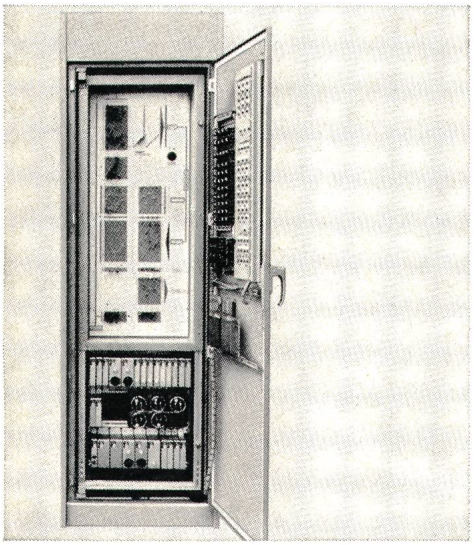


MICAFIL 8048 Zürich

Wenn Sie mit uns steuern, fahren Sie gut



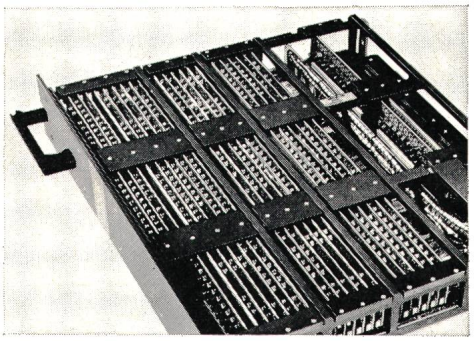
Zur Lösung von Automatisierungsproblemen stehen Ihnen heute verschiedene Techniken zur Verfügung. Einfache Aufgaben werden vorteilhaft mit Relais- oder Schützensteuerungen gelöst. Für umfangreichere Anlagen verwendet man mehr und mehr kontaktlose logische Bausteine.



Die festverdrahtete Steuerung stellt für eine große Zahl von Anwendungsfällen die wirtschaftlichste Lösung dar, hat jedoch den Nachteil, bei Programmänderungen oder Erweiterungen eine geringere Flexibilität zu besitzen.

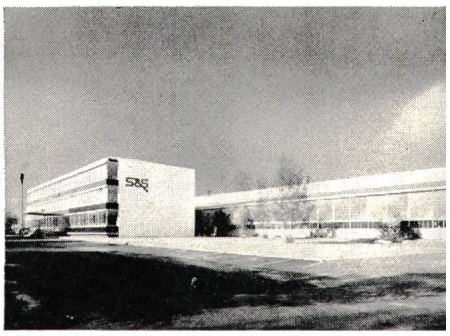
Um die Projektierungszeiten für eine Steuerung zu reduzieren und große Flexibilität in der Programmierung des Funktionsablaufes zu erreichen, wurde eine Reihe von Takt- und Prozeßsteuergeräten entwickelt.

Bei zunehmendem Automatisierungsgrad und Umfang von Steuerungsanlagen dienen freiprogrammierbare Argus-Computer als zentrale Programmspeicher- und Steuerorgane.



Jährlich werden in unserer Firma mehr als 500 Steuerungsprobleme gelöst; viele davon gelten als richtungweisend für den Stand der Technik. Unser umfassendes Lieferprogramm gestattet uns, mit unseren Kunden verschiedene Lösungswege zu diskutieren und den wirtschaftlichsten zu wählen.

Übrigens: Unser spezialisiertes Werk in Suhr steht seit 1957 und wurde seither 2 mal vergrößert. In der gleichen Zeitspanne vervierfachte sich unser Umsatz; heute verarbeiten wir mehr als 800 t Blech pro Jahr für Schaltschränke und Kommandopulte.



S&S

Sprecher & Schuh AG
Aarau / Schweiz

S 01.516-10