

Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins
Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke
Band: 62 (1971)
Heft: 1

Artikel: Schaltungstechnik der gesteuerten Traktionsstromrichter am Wechsel- und Gleichspannungsfahrdraht
Autor: Bossi, H. J. / Löcker, H. / Winkler, K.
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-915785>

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: 18.01.2026

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

Schaltungstechnik der gesteuerten Traktionsstromrichter am Wechsel- und Gleichspannungsfahrdraht

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

von H. J. Bossi, H. Löcker und K. Winkler, Baden

Die Leistungselektronik auf der Basis der Siliziumhalbleiter ist heute in beinahe jedes nur denkbare Anwendungsgebiet eingedrungen. Entweder sind dabei andere Mittel zur Gleichrichtung oder Stromrichtung abgelöst oder aber mit der neuen Technik neuartige Möglichkeiten überhaupt erst erschlossen worden. Eines der Gebiete, auf dem die Leistungselektronik Einzug hielt und immer noch hält, ist die Traktion. Wie kaum irgendwo, ist hier eine Vielzahl von Lösungen beschrieben und diskutiert worden. Von der einfachen Thyristorschalthilfe für den Laststufenschalter bis zum komplexen thyristorgespeisten Asynchronmotor reicht das Spektrum der Vorschläge und Realisationen. Im Rahmen dieses Artikels soll nur ein Ausschnitt aus dem Spektrum behandelt werden, und zwar jener Teil, der heute als eingeführt betrachtet werden kann und dessen Anwendung auch für die Zukunft gesichert erscheint. Auf der Wechselspannungsseite ist dies der natürlich kommutierte Stromrichter auf der Grundlage der Einphasenbrückenschaltung und auf der Gleichspannungsseite der Zerhacker oder Gleichstromsteller. Es sollen dabei jene Gesichtspunkte und Probleme herausgehoben werden, die bahnspezifisch sind.

1. Leistungselektronik in der Wechselspannungstraktion

1.1 Einleitung

Bevor man sich genauer mit der Schaltungstechnik befasst, muss man sich klar werden darüber, welche Gründe der Leistungselektronik gerade im Bahnsektor zum Durchbruch verholfen haben:

a) An erster Stelle stehen sicher die verbesserten Adhäsionsverhältnisse. Je nach der gewählten Schaltung ergeben sie sich aus einer Verringerung der Drehmomentpulsation oder aber infolge der stufenlosen Steuerung dadurch, dass dauernd nahe an der Adhäsionsgrenze gefahren werden kann.

b) Bei gleichem Einbauvolumen ergibt sich eine erhöhte Motorleistung durch den Ersatz des Wechselstrommotors durch den Wellenstrommotor. Aus den beiden ersten Punkten resultiert eine auf das Lokomotivgewicht bezogene, erhöhte Anhängelast.

c) Ein weiteres wesentliches Argument sind die verringerten Unterhaltskosten durch den Wegfall eines grossen Teiles der mechanischen Kontakte. Etwa noch vorhandene Schütze dienen lediglich zur Umgruppierung der Schaltungselemente für Fahr- und Bremsbetrieb oder Rückwärts- und Vorwärtsfahrt. Die Schaltzahlen werden dadurch stark reduziert, und die Schaltungen erfolgen stromlos.

d) Bei entsprechender Wahl der Schaltung besteht die Möglichkeit des Nutzbremsbetriebes, wobei nicht verhehlt werden soll, dass gerade die Rekuperation eine Anzahl zusätzlicher Probleme stellt.

e) Mit Stromrichterlösungen können einfach für verschiedene Stromsysteme geeignete Fahrzeuge realisiert werden.

f) Eine getrennte Anspeisung von Motoren und Drehgestellen bietet keine Schwierigkeiten.

g) Als letzter Punkt sei erwähnt, dass die Leistungselektronik eigentlich eine Voraussetzung für die Einführung des automatischen Zugsbetriebes darstellt. Nur das verschleissfreie, elektroni-

sche Stellglied erlaubt es, dass jede Geschwindigkeit praktisch punktgenau gefahren werden kann.

Leider stehen diesen positiven Punkten auch einige Nachteile gegenüber, und es muss gesagt werden, dass unter bestimmten Umständen diese Nachteile so ins Gewicht fallen, dass die Einführung der Leistungselektronik verzögert oder zumindest stark behindert wird.

a) Als erstes sei der erhöhte Bedarf an Blind- und Verzerungsleistung erwähnt. Dies ist eine direkte Folge der stufenlosen und verlustlosen Steuerung und führt zu einer erhöhten Belastung der Unterwerke und Leitungen. Durch Massnahmen auf der Seite der Leistungselektronik können üblicherweise zulässige Werte erreicht werden.

b) Das Hauptproblem, das durch die Leistungselektronik entsteht, liegt in der elektromagnetischen Kompatibilität mit anderen Systemen, wie z. B. Fernmeldesystemen oder Signal- und Sicherungssystemen. Die Leistungselektronik bringt es mit sich, dass der Fahrdrahtstrom nicht mehr sinusförmig ist. Weiter treten beim Zünden und Löschen der Ventile hochfrequente Einschwingvorgänge auf. Stromüberschwingungen in einem weiten Frequenzbereich können daher zur Beeinflussung anderer Systeme führen. Einseitige Massnahmen auf seiten der Leistungselektronik, die nur einigermaßen die gewünschte Reduktion der Beeinflussung bringen sollen, scheitern am notwendigen Bauvolumen und an den Kosten. Nur eine konzertierte Aktion in allen beteiligten Systemen wird hier Abhilfe bringen.

c) Als letzter Punkt seien die Platz- und Gewichtsprobleme auf dem Fahrzeug erwähnt, die dadurch entstehen, dass im wesentlichen nur der Laststufenschalter entfällt, Stromrichter und Glättungsdrösselspulen jedoch neu dazukommen. Dass es Sache der Leistungselektronik ist, durch entsprechende schaltungstechnische und konstruktive Massnahmen das Problem zu meistern, ist selbstverständlich.

1.2 Die Schaltungsgrundelemente der Stromrichtertechnik

Bevor wir uns einigen typischen Schaltungen zuwenden, sollen ganz kurz die beiden Grundelemente der Stromrichtertechnik, das ungesteuerte und das gesteuerte Ventil, betrachtet werden, ohne auf das physikalische Prinzip einzugehen, das realen Bauelementen zugrunde liegt [1] ¹⁾. Fig. 1 zeigt die Symbole und die u/i -Kennlinien der beiden Ventilarten.

Das ideale ungesteuerte Ventil stellt einen Widerstand Null dar für die eine Stromrichtung — die Durchlassrichtung — und einen Widerstand unendlich für die andere Stromrichtung — die Sperrrichtung. Das reale Ventil führt allerdings einen relativ kleinen Strom in Sperrrichtung und hat auch einen bestimmten Spannungsabfall in der Durchlassrichtung. Dem Schaltungselement entspricht auf der Komponenten- und Geräteseite die Diode, die für Leistungselemente heute fast ausschliesslich auf der Basis von hochreinen Siliziumeinkristallen hergestellt wird und in den verschiedenen konstruktiven Formen wie Flachbodendiode, Schraubdiode oder Scheibendiode auf den Markt kommt.

¹⁾ Siehe Literatur am Schluss des Aufsatzes.

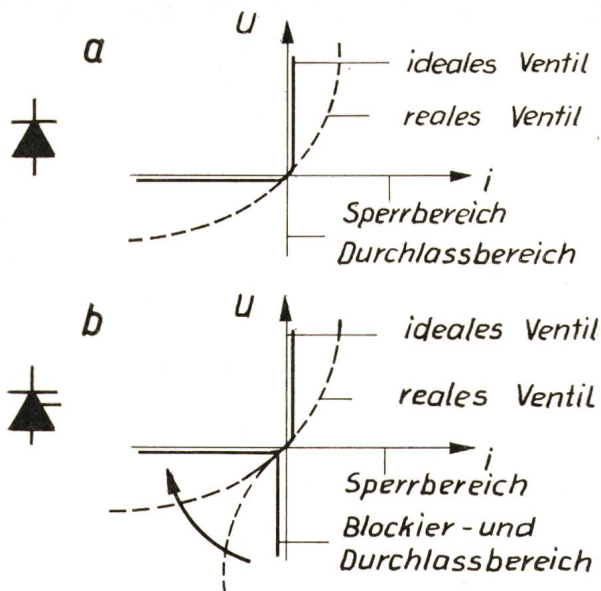


Fig. 1

Symbole und Kennlinien der Schaltungsgrundelemente der Stromrichtertechnik

- a ungesteuertes Ventil
b gesteuertes Ventil
 U Spannung; i Strom

Dioden mit einem Sperrvermögen von einigen 1000 V und einem Durchlassvermögen von einigen 100 A sind die heute auf dem Markt erhältlichen Spitzenprodukte.

Das ideale gesteuerte Ventil verhält sich in der Sperrrichtung genau wie das ungesteuerte Ventil. In der Vorwärts- oder Durchlassrichtung sind nun aber zwei diskrete Zustände, nämlich Widerstand Null (Leiten) oder Widerstand unendlich (Blockieren) möglich. Durch einen Leistungspuls auf eine Steuerelektrode kann das Ventil vom blockierenden in den leitenden Zustand überführt werden. Es ist dabei wesentlich, dass, wenn der Leitzustand einmal besteht, er nur dadurch wieder aufgehoben werden kann, dass der Hauptstrom zu Null gemacht wird. Über die Steuerelektrode kann das Element nicht mehr beeinflusst werden. Auf der Komponentenseite entspricht dem gesteuerten Ventil der Thyristor, der — wie die Leistungsdioden — heute nur mehr auf der Basis von Silizium erhältlich ist. Die konstruktiven Formen sind ungefähr dieselben wie bei der Diode, und auch die Strom- und Spannungswerte liegen in der gleichen Größenordnung, wenn auch im Mittel etwas tiefer. Es ist wichtig, zu erwähnen, dass der Einsatz von gesteuerten und ungesteuerten Halbleiterelementen nicht nur durch die zulässigen Spannungen und Ströme bestimmt wird, sondern auch durch ihr dynamisches Verhalten beim Einschalten und Ausschalten und durch ihre Empfindlichkeit gegenüber schnellen Spannungsänderungen. Das scheinbar einfache «Einpakken» der Halbleiterelemente ist daher vielmehr ein komplizierter Optimierungsprozess, wobei der Aufwand für Kühlung für Überstrom- und Überspannungsschutz und für zusätzliche Beschaltungskomponenten gegen übermäßige dynamische Beanspruchungen sorgfältig gegeneinander abgewogen werden müssen.

1.3 Für den Bahnbetrieb typische Stromrichterschaltungen

Damit kann man übergehen zur Beschreibung einiger typischer Stromrichterschaltungen, wobei nur solche ausgewählt wurden, die sich im praktischen Betrieb bewährt ha-

ben. Grundschriftung ist dabei durchgehend die einphasige Brücken- oder Grätzschaltung [2].

1.3.1 Der ungesteuerte Gleichrichter mit Amplitudensteuerung

Fig. 2 zeigt das Prinzipschaltbild und den zeitlichen Verlauf der wichtigsten Spannungen und Ströme. Die Stromrichterventile richten die Spannungshalbwellen der Netzspannung gleich. Die auf der Gleichspannungsseite herausgeschnittenen Sinusabschnitte stellen den Spannungsabfall dar, der beim Übergang des Stromes von einem Ventil auf das nächstfolgende entsteht. Charakteristisch ist der rechteckförmige Netzstrom mit seinem starken Oberschwingungsgehalt. Erwähnenswert ist dabei, dass die Glättungsdrosselspule eines jener Elemente ist, mit dem der Oberschwingungsgehalt ganz wesentlich beeinflusst werden kann. Eine kleine Induktivität der Drosselspule führt zwar zu einem größeren Oberschwingungsgehalt des Laststromes und damit zu höheren Drehmomentpulsationen, verkleinert aber gleichzeitig den Oberschwingungsgehalt des Netzstromes. Durch eine sorgfältige Dimensionierung kann hier ein Optimum zwischen Motorbeanspruchung und Drehmomentpulsation einerseits und dem Netzoerschwingungsgehalt andererseits erreicht werden.

Die Regulierung der Spannung erfolgt gestuft mit dem Laststufenschalter als reine Amplitudensteuerung. Die

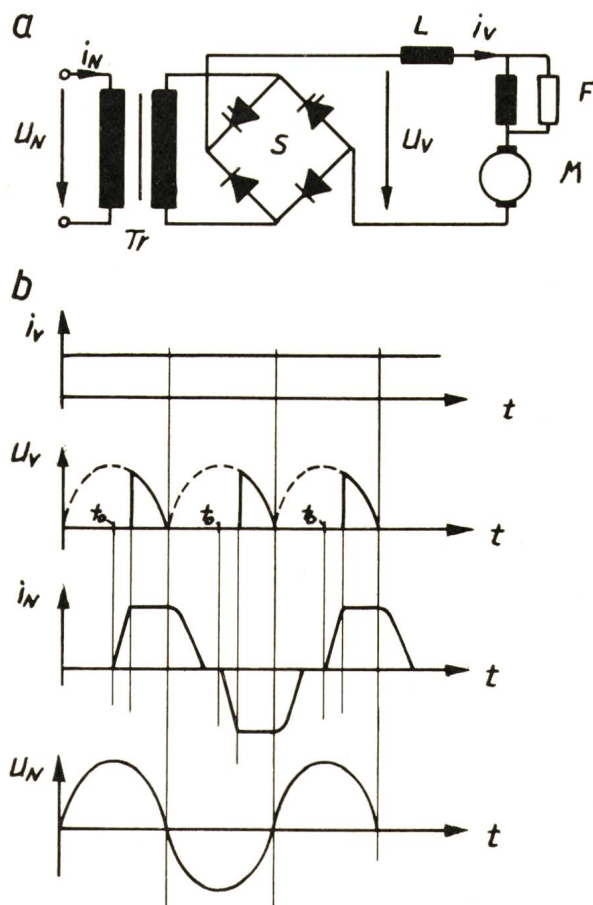


Fig. 2

Schaltbild und zeitlicher Verlauf der wichtigsten Spannungen und Ströme eines ungesteuerten Gleichrichters mit Amplitudensteuerung

a Schaltbild

b Verlauf von U_V , U_N , i_V , i_N

Voraussetzung: $L \rightarrow \infty$

Tr Gleichrichtertransformator; S Stromrichter; L Glättungsdrosselspule; F geschuntetes Motorfeld; M Rotor des Motors; U_N konstante Netzspannung; U_V variable Verbraucherspannung; i_N Netzstrom; i_V Verbraucherstrom; t Zeit

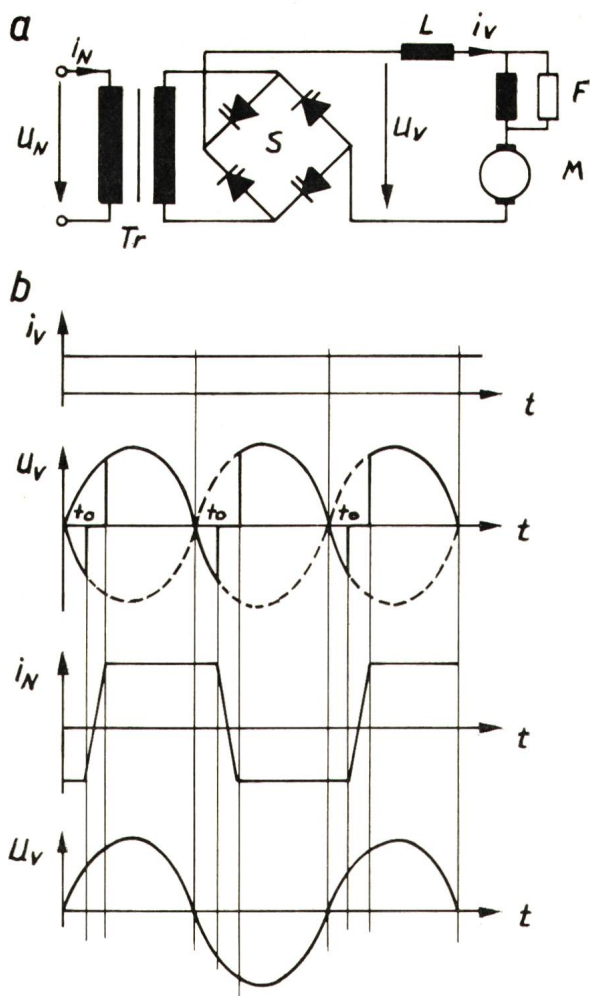


Fig. 3

Schaltbild und zeitlicher Verlauf der wichtigsten Spannungen und Ströme einer gesteuerten einphasigen Brückenschaltung

a Schaltbild

b Verlauf von U_V , U_N , i_V , i_N

Voraussetzung: $L \rightarrow \infty$

Tr Stromrichtertransformator; S Stromrichter; L Glättungsdrosselspule; F geschuntetes Motorfeld; M Rotor des Motors; U_N konstante Netzspannung; U_V variable Verbraucherspannung; i_N Netzstrom; i_V Verbraucherstrom; t_0 Zündmoment; t Zeit

Stromrichterschaltung erlaubt die Verwendung des Gleichstrommotors mit allen seinen Vorteilen und ist einfach, billig und äusserst betriebssicher. Demgegenüber steht die Tatsache, dass die Gleichspannung nicht stufenlos einstellbar ist und damit die volle Ausnützung der Reibungskraft nicht möglich ist. Weiter bleibt auch der Stufenschalter als unterhaltsintensives Gerät weiter bestehen, und auf eine Rekuperation muss verzichtet werden.

1.3.2 Die vollgesteuerte Einphasenbrückenschaltung

Fig. 3 zeigt Schema und Verlauf der wichtigsten Spannungen und Ströme. Im Unterschied zur ungesteuerten Schaltung ist der Einschaltaugenblick der einzelnen Stromrichterventile jetzt frei wählbar. Wird der Zündaugenblick im Bereiche der positiven Anoden-/Kathodenspannung verschoben, so können entsprechende Sinusausschnitte der treibenden Wechselspannung herausgeschnitten werden. Im Beispiel von Fig. 3 zünden die Elemente im mit t_0 bezeichneten Zeitpunkt. Auf diese Weise kann nun die Ausgangsspannung stufenlos verstellt werden, wobei am Stromrichterausgang auch negative Spannungswerte für Momentan- und Mittelwerte möglich sind. Die stufenlose Verstellung und die durch

die Spannungsumkehr mögliche Rekuperation sind die eigentlichen Vorteile der vollgesteuerten Schaltung. Weiter entfällt auch der Laststufenschalter. Demgegenüber stehen der erhöhte Blindleistungsbedarf infolge der notwendigen Steuerblindleistung und auch die höhere Verzerrung des Netzstromes. Beide Punkte führen dazu, dass die Schaltung in der gezeigten Form für grosse Leistungen kaum eingesetzt werden kann. Auf Traktoren oder Triebwagen kleinerer Leistung hat die Schaltung aber durchaus ihre Berechtigung.

1.3.3 Die halbgesteuerte Einphasenbrückenschaltung

In halbgesteuerten Schaltungen wird jeweils ein Teil der gesteuerten Ventile durch ungesteuerte Ventile ersetzt. Bei der Einphasenschaltung können grundsätzlich die beiden gesteuerten Ventile, die an einem Wechselspannungspol hängen, oder jene an einem Gleichspannungspol durch ungesteuerte Ventile ersetzt werden. Aus Gründen, die hier nicht näher zu erläutern sind, wird in der Traktion die Variante nach Fig. 4 gewählt, die unsymmetrisch halbgesteuerte Schaltung.

Charakteristisch für diese Schaltung ist die Treppenform des Netzstromes. Während der stromlosen Pausen im Verlaufe des Netzstromes fliesst der Laststrom über die beiden ungesteuerten Ventile zwischen den beiden Gleichstropolen weiter. Gleichstromseite und Wechselstromseite sind während dieser Zeit vollständig entkoppelt.

Die halbgesteuerte Brückenschaltung erlaubt die stufenlose Spannungsverstellung bei kleineren Kosten und geringerem Blindleistungsbedarf als die vollgesteuerte Brücke. Allerdings begibt man sich der Rekuperationsmöglichkeit,

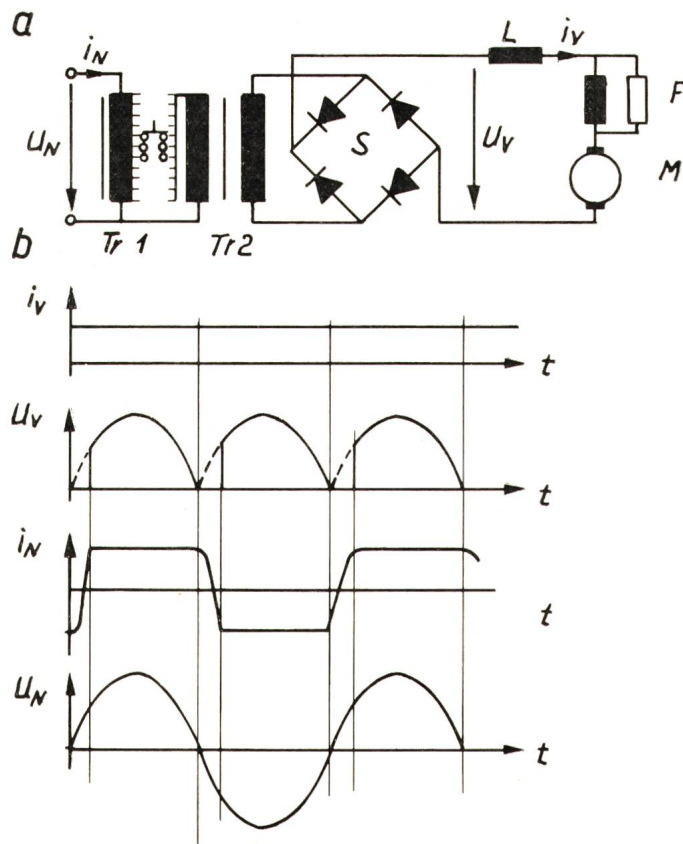


Fig. 4

Schaltbild und zeitlicher Verlauf der wichtigsten Spannungen und Ströme einer unsymmetrisch halbgesteuerten einphasigen Brückenschaltung

Tr 1 Autotransformator mit Stufenschalter; Tr 2 Gleichrichtertransformator

Übrige Bezeichnungen siehe Fig. 3

und eine Verbesserung bezüglich Netz Oberschwingungen ist kaum festzustellen.

1.3.4 Gemischte Schaltungen

Aus den beschriebenen Schaltungen 1.3.1 bis 1.3.3 lassen sich durch Serieschaltung beliebige neue Möglichkeiten ableiten, die alle den gleichen Zweck haben, nämlich die Netz Oberschwingungen und den Blindleistungsbedarf möglichst klein zu halten. Fig. 5 zeigt drei Varianten in zweistufiger Ausführung, wobei mehrstufige Lösungen sich grundsätzlich gleich verhalten, jedoch eine weitere Verbesserung in bezug auf Blindleistungsbedarf und Oberschwingungsgehalt des Netzstromes bringen. Bei allen Varianten ist wesentlich, dass die Seriebrücken nicht gleichzeitig, sondern nacheinander angesteuert werden. Es wird also jeweils nur mit einer Brücke reguliert, während die anderen entweder positive, negative oder Spannung Null abgeben. Eine ungesteuerte Brücke gibt immer ihre volle positive Spannung

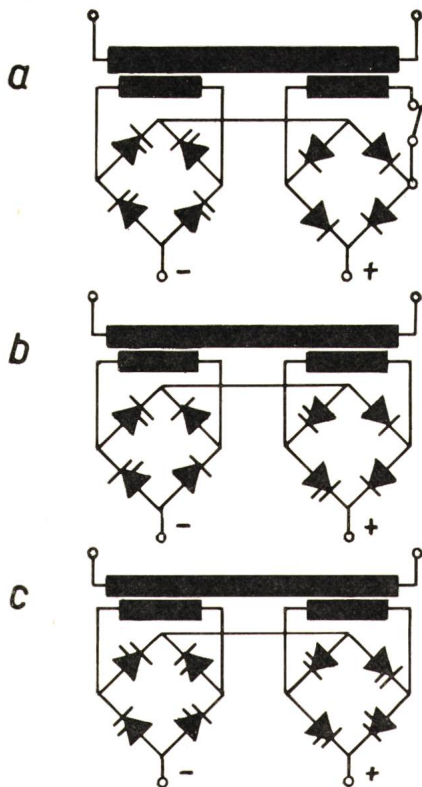


Fig. 5
Serieschaltung von Einphasenbrücken
a vollgesteuert — ungesteuert
b halbgesteuert — halbgesteuert
c vollgesteuert — vollgesteuert

ab, eine vollgesteuerte entweder volle negative oder positive Spannung, während eine halbgesteuerte Brücke keine oder volle positive Spannung liefert. Das Netz sieht nur die Steuerblindleistung eines kleinen Teilbereiches und nicht jene der Gesamtschaltung. Fig. 6 zeigt die Verhältnisse für die Blindleistung.

Variante a, die Serieschaltung einer vollgesteuerten mit einer ungesteuerten Brücke, verhält sich in bezug auf Blindleistung wie eine halbgesteuerte Brücke; die netzseitigen Oberschwingungsverhältnisse sind aber kaum besser als bei einer vollgesteuerten Brücke. Ein Rekuperationsbetrieb bei halber Motorspannung ist durch einfaches Abtrennen der Diodenbrücke realisierbar.

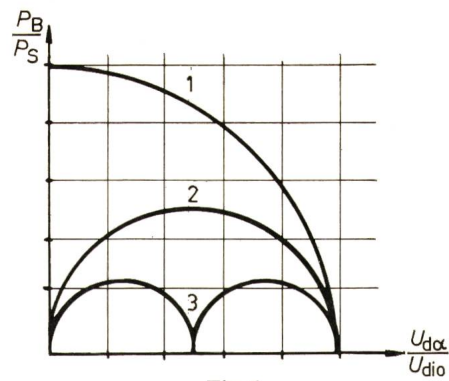


Fig. 6
Die auf die Scheinleistung P_S bezogene Steuerblindleistung P_B in Funktion des Aussteuergrades $U_{d\alpha}/U_{d10}$
 $U_{d\alpha}$ Gleichspannung bei Rücksteuerung; U_{d10} ideale Leerlaufgleichspannung bei Vollaussteuerung
Die Kommutierungsblindleistung ist vernachlässigt
1 vollgesteuerte Einphasenbrücke
2 Variante a vollgesteuert—ungesteuert in Folgesteuerung
halbgesteuerte Einphasenbrücke;
3 Variante b halbgesteuert—halbgesteuert in Folgesteuerung
Mit Variante c sind je nach Art der Aussteuerung alle Kurven realisierbar

Variante b, die Serieschaltung zweier oder auch mehrerer halbgesteuerter Brücken, ergibt sowohl ein in bezug auf Blindleistung als auch in bezug auf die netzseitigen Oberschwingungen gegenüber der einfachen Schaltung verbessertes Verhalten. Ein Rekuperationsbetrieb ist allerdings nicht möglich.

Bei Variante c, der Serieschaltung zweier oder auch mehrerer vollgesteuerter Brücken, kann durch entsprechendes Ansteuern der Brücken und der einzelnen Brückenventile ein beliebiges Verhalten entsprechend der Varianten a oder b gegeben werden. Rekuperation bei voller Spannung ist hier realisierbar.

Fig. 7 zeigt eine Schaltung, die in ihrer Funktionsweise den mehrstufigen Lösungen nach 1.3.4 ähnelt, jedoch mit einem stark reduzierten Aufwand an Halbleiterelementen auskommt. Dies muss allerdings mit einer grossen Zahl mechanischer Kontakte erkauft werden, und es ist kaum anzunehmen, dass sich diese Schaltung in einem automatischen Zugbetrieb mit grosser Schalthäufigkeit durchsetzen wird, dies umso mehr, als die Preisentwicklung der Halbleiterelemente immer noch fallend ist. Schaltgeräte sollten nur mehr zu Schutzzwecken oder auch zum, nicht sehr häufigen, Umgruppieren von Schaltungselementen, z. B. für Vor- und Rückwärtsfahrt oder Fahr- und Bremsbetrieb, dienen. Die vom schaltungstechnischen Standpunkt her sehr interessante Lösung funktioniert mit beliebig vielen Stufen, und zwar so,

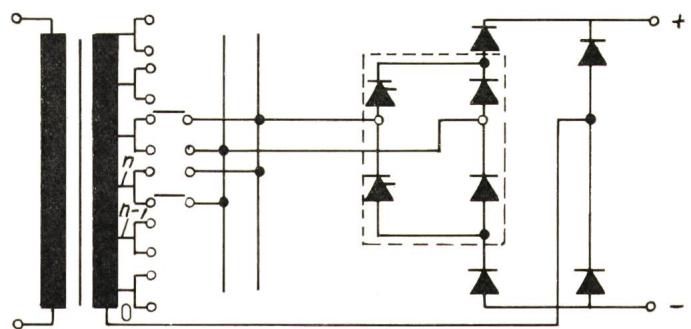


Fig. 7
Kombination einer Schützensteuerung mit einer halbgesteuerten Brücke
0; n-1; n Transformatoranklemmen

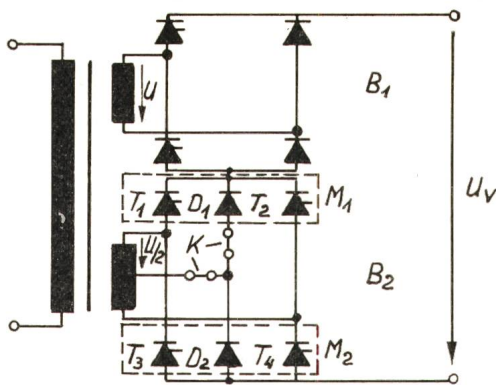


Fig. 8

Vierstufig halbgesteuerte Brückenschaltung

B_1 Brückenschaltung 1; B_2 Brückenschaltung 2, bestehend aus M_1 Mittelpunktschaltung 1, M_2 Mittelpunktschaltung 2; $T_{1...4}$ gesteuerte Ventile; $D_{1...2}$ Freilaufventile; U Transformatorspannung; U_V Verbraucherspannung; K Trennstellen

dass bei gesperrten Thyristoren eine ungesteuerte Brücke an den Klemmen 0 und $n-1$ liegt. Wird ein Thyristor leitend gemacht, so liegt nun eine halbgesteuerte Brücke an den Klemmen 0 und n . Die Ventile innerhalb des Kästchens in Fig. 7 müssen für die Spannung zwischen zwei benachbarten Klemmen ausgelegt werden. Die Ventile ausserhalb werden auf volle Transformatorspannung dimensioniert. Ausgangsspannung und Netzurückwirkung entsprechen dabei einer n -stufigen Serieschaltung von halbgesteuerten Brücken. Rekuperation ist selbstverständlich nicht möglich.

Fig. 8 zeigt eine Schaltung, die in ihrer vierstufigen Variante immer noch eine Einsparung an Elementen bringt, die mechanischen Kontakte jedoch nur dazu benützt, um einen Rekuperationsbetrieb bei halber Spannung zu gewährleisten.

Betriebsarten:

0... $\frac{1}{4}$ volle Spannung:	M_1 gesteuert B_1 M_2 in Freilauf
$\frac{1}{4}$... $\frac{1}{2}$ volle Spannung:	M_1 volle Spannung M_2 gesteuert B_1 in Freilauf
$\frac{1}{2}$... $\frac{3}{4}$ volle Spannung:	M_1 gesteuert M_2 in Freilauf B_1 volle Spannung
$\frac{1}{2}$... $\frac{1}{1}$ volle Spannung:	M_1 volle Spannung M_2 gesteuert B_1 volle Spannung

Die Schaltung weist den Vorteil auf, dass in allen Betriebszuständen die Transformatorwicklungen gleichmässig belastet werden. Die Funktionsweise beruht auf dem Prinzip der Folgesteuerung, d. h. die gesteuerten Elemente einer in sich geschlossenen Schaltung werden innerhalb einer Periode an Netzfrequenz nicht gleichzeitig, sondern zeitlich gestaffelt gezündet. Die Funktion wird sofort klar, wenn man erkennt, dass die Brücke B_2 im wesentlichen aus der Serieschaltung zweier Mittelpunktschaltungen besteht, wobei die Mittelpunktschaltung M_1 aus den gesteuerten Ventilen T_1 und T_2 und dem Freilaufventil D_1 besteht, M_2 hingegen aus T_3 , T_4 und D_2 . Die Spannung wird dabei nur mit einer der beiden Mittelpunktschaltungen reguliert, während die andere entweder vollständig gesperrt (Spannung Null) oder vollausgesteuert ist. Auf diese Weise entsteht in eleganter Weise eine 4stufige Lösung, wobei durch Öffnen der angeedeuteten Trennstellen ein Rekuperationsbetrieb bei halber Spannung ermöglicht wird.

1.4 Spezielle Probleme der Stromrichtertraktion

Die bisher aufgezeigte Schaltungstechnik hat zwar ihren Hauptanwendungsbereich in der Traktion, ist aber auch allgemein anwendbar. Im folgenden sollen einige Problemkreise angeschnitten werden, die traktionsspezifisch sind.

1.4.1 Die Beeinflussung von nieder- oder hochfrequenten Stromkreisen durch Stromrichter

Die Beeinflussung hochfrequenten Stromkreise ist bedingt durch die raschen Potentialsprünge, wie sie beim Schalten der Thyristoren auftreten, wobei sowohl Lös- als auch Zündschwingungen von Bedeutung sind. Abhilfemassnahmen bestehen in sorgfältiger Verkabelung, Abschirmungen, HF-Entstörfilter, und sind alle relativ leicht durchzuführen.

Komplexer liegen die Verhältnisse auf der Niederfrequenzseite, wo die Oberschwingungen des Netzstromes die primäre Ursache der Beeinflussungen sind. Fig. 9 zeigt typische Kurvenformen für Netzstrom und Netzspannung, wie sie im Betrieb auftreten können. Es sei dabei noch einmal betont, dass die Erzeugung von netzseitigen Stromoberwellen dem Stromrichter inhärent ist. Massnahmen auf der Stromrichterseite sind die Verwendung der schon behandelten mehrstufigen Schaltungen und der Einsatz von Filterkreisen oder Saugtransformatoren. Kosten, vor allem aber der Platzbedarf, werden sehr schnell prohibitiv, bevor auch nur eine annähernd genügende Oberschwingungsreduktion erreicht wird. Die bei 3phasigem Anschluss viel verwendete Möglichkeit, durch höherpulsige Schaltungen den Oberschwingungsgehalt des Netzstromes zu verkleinern, ist bei einphasigem Anschluss leider nicht durchführbar. Ein Lösungsweg auf der Steuerseite der Stromrichter, der mindestens in einem begrenzten Rahmen Erfolg verspricht, beruht auf dem Prinzip der Folgesteuerung. Dabei werden Betriebspunkte mit hohem Oberschwingungsgehalt entweder ganz vermieden oder schnell durchfahren. Eine wesentliche Reduktion einzelner Frequenzen ist möglich, nicht aber des Gesamtspektrums. In vielen Fällen sind daher zusätzliche Massnahmen in den beeinflussten Stromkreisen, wie z. B. Symmetrierung oder Erhöhung des Nutzpegels, erforderlich [3].

1.4.2 Das Bügelspringen

Die durch das Bügelspringen verursachten Unterbrüche zwischen Fahrleitung und Stromabnehmer liegen im Bereich einiger μ s bis einiger s. Der Gleichrichterbetrieb ist dabei unkritisch; im Rekuperationsbetrieb hingegen können Schwie-

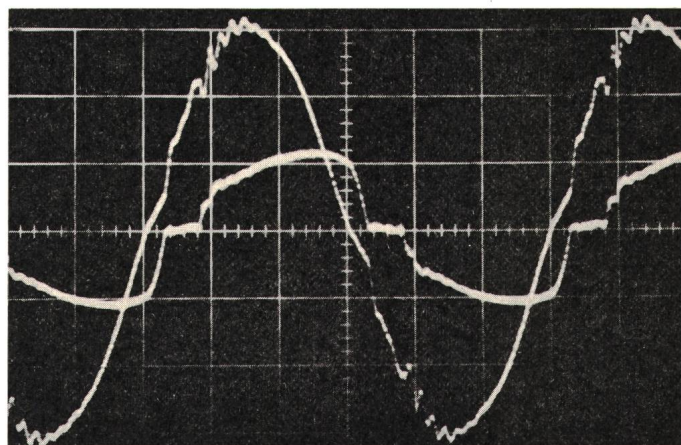


Fig. 9

Typischer Verlauf von Netzstrom (kleine Amplitude) und Netzspannung (grosse Amplitude) einer halbgesteuerten Einphasenbrücke

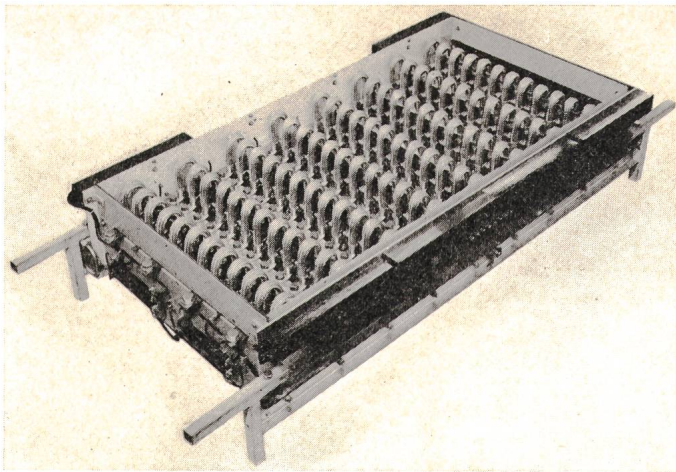


Fig. 10
Diodengestell mit 12 parallelen und 8 in Serie geschalteten Dioden eines Brückenzweiges
Vier solcher Einheiten bilden eine Brücke

rigkeiten auftreten. Unstetigkeiten auf der Netzseite, seien es kurzzeitige Unterbrüche oder auch kurzzeitige Spannungseinbrüche, führen nämlich zum sog. Wechselrichterkippen. Diese Erscheinung besteht im wesentlichen darin, dass der Stromrichter sein Potential auf der Gleichstromseite umkehrt, was eine Kurzschlussbelastung von Generator, Stromrichter und Netz zur Folge hat. Abhilfemassnahmen sind unbedingt erforderlich, wobei die Wahl der Mittel auch von der zu erwartenden Störungshäufigkeit abhängt. Als Massnahmen kommen in Frage:

- a) Ein schneller Gleichstromschalter im Gleichstromkreis;
- b) Eine vollstatische Löscheinrichtung für den Stromrichter, was im Prinzip jedenfalls einem kontaktlosen Schalter entspricht;
- c) Eine bestimmte Gegenenerregung des Fahrmotors im Rekuperationsbetrieb, die die Ausbildung des Kurzschlussstromes stark begrenzt [4].

1.4.3 Der Lückbetrieb

Stromrichter im Leistungsbereich der Traktion werden üblicherweise dreiphasig ausgeführt, und einphasige Lösungen beschränken sich auf kleine Leistungen bis ca. 1 kW. Die Traktionsanwendung ist hier die grosse Ausnahme, und es ist daher nicht verwunderlich, dass einige Phänomene des Lückbetriebes in Einphasenschaltungen erst heute richtig erkannt werden. Unter Lücken des Gleichstromes versteht man die Tatsache, dass bei hoher Motorspannung und kleinem Laststrommittelwert im zeitlichen Verlauf des Laststromes stromlose Pausen auftreten. Dies wäre nicht weiter schlimm, wenn dabei nicht Betriebszustände möglich würden, bei denen der Laststrom nicht mehr von allen parallelen Thyristoren eines Zweiges übernommen wird. Gerade in der Traktionstechnik, wo mit möglichst kleinen Glättungsinduktivitäten gearbeitet wird, könnten einzelne Thyristoren strommässig überlastet werden. Abhilfemassnahmen können sowohl steuerseitig als auch starkstromseitig getroffen werden. Eine besonders bei kleinen Strömen hochwirksame Glättungsdrösselpule oder eine hohe Ohmsche Grundlast sind die recht aufwendigen Möglichkeiten im Lastkreis. Dauer- oder Kettenimpulse an den Zündelektroden der Thyristoren über den kritischen Zeitbereich oder aber sog. Bedarfsimpulse sind die Massnahmen am Steuerkreis. Bei der sehr ele-

ganten Bedarfsimpulsmethode werden Kurzzeitimpulse immer nur dann abgegeben, wenn dies der Betrieb erfordert. Durch einfache Erfassung von Strom und Spannung an bestimmten Orten können diese Zeitpunkte bestimmt werden [5].

1.5 Die konstruktive Ausführung von Traktionsstromrichtern

Abschliessend soll kurz gezeigt werden, wie die Stromrichterschaltungen gerätetechnisch realisiert werden können. Sowohl was die Kühlung als auch den Aufbau betrifft, stehen für den Traktionsbetrieb die gleichen Möglichkeiten wie für stationäre Anlagen zur Verfügung, immer unter der Voraussetzung, dass die spezifischen Traktionsanforderungen berücksichtigt werden.

Kühlungsseitig stand bisher die forcierte Luftkühlung im Vordergrund, einmal, weil immer noch eine gewisse Scheu vor flüssigen Kühlmedien auf dem Fahrzeug besteht, anderseits weil Luftkühlung eine bessere Zugänglichkeit zu den einzelnen Komponenten gewährleistet; ein durchaus legitimer Wunsch, wenn man bedenkt, dass in der Traktion überhaupt keine Erfahrungen mit Halbleiterelementen vorlagen. Gerade die inzwischen gewonnene Erfahrung im Betrieb wird die Flüssigkeitskühlung zumindest für bestimmte Anwendungen stark in den Vordergrund bringen.

In bezug auf die Einbauart wurden Geräte mit Festeinbau der Halbleiterelemente und solche in Einschubbauweise ausgeführt. Eine Version mit Festeinbau, die besonders bei Dioden Vorteile bringt, zeigt Fig. 10.

Das Gestell enthält 12 parallele und 8 seriegeschaltete Dioden eines Zweiges. 4 Gestelle bilden eine Stromrichtereinheit. Diodensicherungen werden hier keine eingesetzt. Auf einer Lokomotive Re 4/4 der BLS erbringen 288 Dioden in einer analogen Konstruktion eine Stundenleistung von 4980 kW [6].

Fig. 11 zeigt einen Thyristorblock, wie er ebenfalls auf einer Re 4/4 der BLS eingebaut ist. Ein Einschub (Fig. 12) enthält zwei in Serie geschaltete Thyristoren resp. zwei pa-

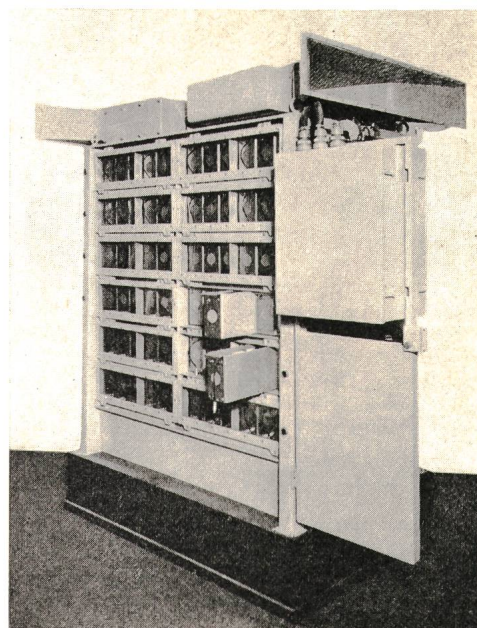


Fig. 11
Stromrichterblock für die beiden parallelgeschalteten Fahrmotoren eines Drehgestells einer Re 4/4
Anschluss-Wechselspannung: 2×738 V
Stundenstrom: 2600 A

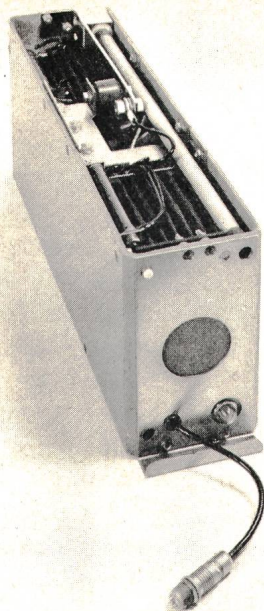


Fig. 12
Stromrichtereinschub als Grundbaustein des Blockes in Fig. 11

rallelschaltete Dioden mit den dazugehörigen Kühlkörpern, Sicherungen sowie Beschaltungs- und Steuerelementen. 2 Blöcke mit total 192 Thyristoren und 96 Dioden erbringen dabei eine Stundenleistung von 4980 kW an der Motorwelle [7].

2. Leistungselektronik in der Gleichstromtraktion

In diesem Abschnitt wird ausschliesslich die Zerkhacker- oder Choppertechnik behandelt. Weiter in die Zukunft weisende Lösungen, wie z. B. der thyristorgespeiste Asynchronmotor, würden den Rahmen dieses Vortrages sprengen. Wie dies schon bei der Wechselstromtraktion getan wurde, sollen zuerst alle jene Konsequenzen der Leistungselektronik zusammengefasst werden, die deren Einsatz überhaupt erst wirtschaftlich machen. Einige, aber nicht alle dieser Punkte sind bereits bei der Wechselstromtraktion aufgeführt worden:

a) Auch bei der Gleichstromtraktion ergibt sich eine bessere Ausnutzung der Motorleistung. Ein Betrieb nahe an der Adhäsionsgrenze ist möglich. Alle Unstetigkeiten im zeitlichen Verlauf der Antriebskraft, wie sie früher beim Zu- und Wegschalten der Vorwiderstände auftraten, entfallen jetzt völlig.

b) Ein wichtiger Punkt ist die Tatsache, dass die Leistungssteuerung durch den Zerkhacker verlustlos erfolgt. Damit wird die bei der klassischen Lösung im Vorwiderstand vernichtete Energie eingespart, was je nach Betriebsart und Verkehrslage 5...15 % der Gesamtleistung betragen kann. Weiter wird das bestehende Netz von hohen Anfahrrömen entlastet, so dass die bestehenden Unterwerke ein erhöhtes Verkehrsvolumen bewältigen können, da die Beanspruchung durch Anfahrröme entfällt.

c) Auch starke Schwankungen der Netzspannung beeinflussen bei richtiger Dimensionierung des Antriebes die abgegebene Leistung nicht. Bei einem klassischen Antrieb mit Vorwiderständen ist eine Auslegung auf tiefste Netzspannung problematisch, da in diesem Fall zu hohe Verluste im Dauerbetrieb auftreten.

d) Eine Nutzbremsung bis beinahe zum Stillstand ist möglich, während bei der klassischen Lösung nur so lange rekupe-riert werden kann, bis die Motorspannung bei Vollerregung auf die Grösse der Netzspannung gesunken ist.

Die Leistungselektronik bringt nun selbstverständlich auch neue Probleme mit sich, die eigentlich alle damit zusammenhängen, dass dem Netz kein zeitlich konstanter Strom entnommen und dem Motor keine zeitlich konstante Spannung angeboten wird. Die Probleme sind allerdings weit einfacher zu lösen als bei der Wechselstromtraktion. Ein auf

dem Triebfahrzeug mitgeführtes Eingangsfilter verkleinert die ans Netz abgegebenen Stromüberschwingungen fast beliebig. Die Filterlösung ist im Gegensatz zur Wechselstromtraktion darum möglich, weil:

a) Gleichspannung grundsätzlich weniger Dimensionierungsprobleme für das Filter stellt als eine Wechselspannung.

b) Die Arbeitsfrequenz der Zerkhacker in weiten Grenzen frei wählbar ist und eine bis zwei Grössenordnungen höher liegt als die üblichen Netzfrequenzen.

c) Mit mehrpulsigen Sonderschaltungen die Oberschwingungsfrequenzen noch weiter erhöht werden können.

Hochfrequente Störströme im Bereiche von 100 kHz bis einige MHz können mit Sicherheit durch geeignete Beschaltungen genügend stark reduziert werden.

Oberschwingungen im Maschinenstrom bedeuten zwar zusätzliche Verluste, beeinträchtigen aber das Verhalten kaum. Durch mehrpulsige Sonderschaltungen können auch diese Oberschwingungen klein gehalten werden. Ausserordentliche Kommutierungsschwierigkeiten werden im Zerkhackerbetrieb kaum beobachtet. Sonderschaltungen können gegebenenfalls Verbesserungen bringen.

2.1 Das Grundlelement der Zerkhackertechnik

Das tatsächliche Halbleiterlelement, der Thyristor, entspricht weitgehend dem Grundlelement der Stromrichter-technik, dem steuerbaren Ventil, solange man die Serie- und Parallelschaltung nicht berücksichtigt. In der Zerkhackertechnik ist das grundsätzlich anders. Dem einfachen Zerkhacker-symbol entspricht ein ausserordentlich kompliziertes Gerät. Der natürliche Nulldurchgang des Stromes, der in der Wech-

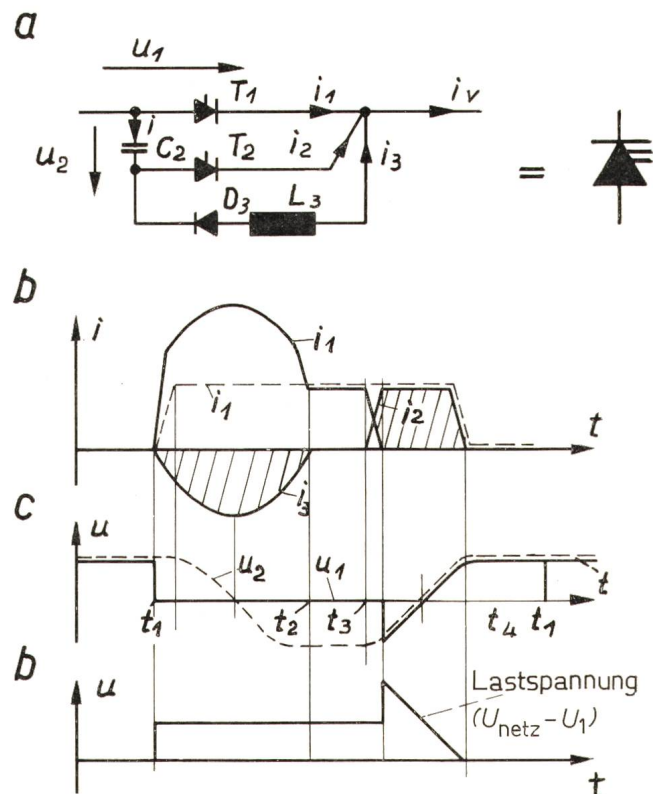


Fig. 13
Schaltung des Zerkhackergrundlelementes und Verlauf der wichtigsten Spannungen und Ströme
a Zerkhackergrundlelement;
b Verlauf der Ströme;
c Verlauf der Spannungen;
d Lastspannung
 T_1 Hauptthyristor; T_2 Löschthyristor; C_2 Löschkondensator;
 D_3, L_3 Umschwingkreis
Weitere Bezeichnungen siehe im Text

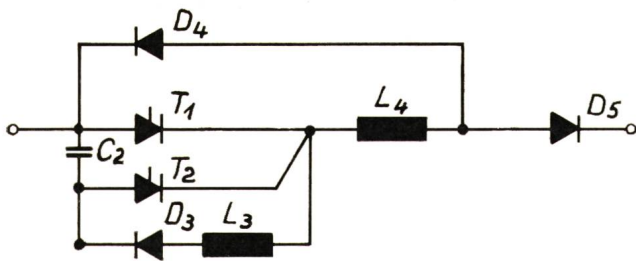


Fig. 14

Schaltung eines Zerkhackergrundelementes für Schwachlast- und Leerlaufbetrieb

D_4 , L_4 zusätzlicher Umschwingkreis; D_5 Sperrdiode
Weitere Bezeichnungen siehe Fig. 13

selbststromtechnik periodisch zum Löschen des Thyristors führt, fehlt in der Gleichstromtechnik. Beim Zerkhackergrundelement ist also nicht bloss der Einschaltmoment, sondern auch der Ausschaltmoment frei wählbar, was eben diesen komplexen Geräteaufbau bedingt. Fig. 13 zeigt eine grundsätzliche Schaltungsmöglichkeit mit dem Verlauf der wichtigsten Ströme und Spannungen [8; 9].

Zum Zeitpunkt t_1 wird der Hauptthyristor T_1 leitend und übernimmt den Laststrom i_L . Je nach der verwendeten Stellerschaltung wird, wie später gezeigt wird, die Netzspannung damit auf die Last geschaltet oder die Last kurzgeschlossen. Zum Zeitpunkt t_1 wird gleichzeitig der Kreis C_2 T_1 L_3 D_3 geschlossen, und der Kondensator C_2 wird so lange umgeladen, als der Kreisstrom positiv ist. Dies ist zum Zeitpunkt t_2 der Fall, und unter Vernachlässigung der Schwingverluste hat C_2 dann seine Polarität umgekehrt und ist für den Löschvorgang bereit. Zum Zeitpunkt t_3 wird der Löschthyristor T_2 gezündet. Der Kondensator C_2 entlädt sich über T_2 , bis der Strom i_1 zu Null wird und T_1 sperrt. Der Laststrom fließt allerdings so lange über C_2 weiter, bis C_2 auf etwa Netzspannung umgeladen ist und ein anderer Kreis, z. B. ein Freilaufkreis, den Laststrom übernimmt. Die Ausgangssituation ist damit wieder hergestellt, und alles kann von vorne beginnen.

Die einzigen Zeitabschnitte, die unabhängig variiert werden können, sind t_2-t_3 und t_4-t_1 . Mit t_2-t_3 wird die Grösse der Leitdauer bestimmt, aus t_4-t_1 zusammen mit t_2-t_3 ergibt sich die Arbeitsfrequenz.

Das betrachtete Grundelement weist nun einige Nachteile auf, die es notwendig machen, in bestimmten Anwendungsfällen die Schaltung zu modifizieren. Einige dieser Nachteile sind:

- a) Die Umladezeit nach dem Löschvorgang ist laststromabhängig. Ein Schwachlast- oder Leerlaufbetrieb ist nicht möglich.
- b) Der Stellbereich ist begrenzt, da die Leitdauer des Grundelementes in den Abschnitten t_1-t_2 (Umladung) und t_3-t_4 (Löschen und Umladen) durch Thyristoreigenschaften gegeben ist und nicht beliebig verkleinert werden kann.
- c) An der Last liegt im Löschmoment eine Spannung, die höher ist als die Netzspannung, und zwar um einen Betrag, der der negativen Löschspannungsspitze des Thyristors T_1 entspricht.

Es seien kurz zwei Schaltungen erwähnt, die diese Nachteile nicht aufweisen.

Fig. 14 zeigt eine Schaltung, die Leerlaufbetrieb gestattet und die Löschspannungsspitze von der Last fernhält. Im Anschluss an den Löschvorgang wird C_2 über T_2 L_4 D_4 umgeladen, wobei Laststrom die Umladung noch unterstützt. Da D_4 während des Lösch- und Umladevorganges Strom führt, kann keine zusätzliche Spannung an der Last erscheinen.

Die Löschspannungsspitze fällt an der Drosselspule L_4 ab. Die Diode D_5 ist notwendig, um bei Gegenspannung von der Lastseite im Leerlauf oder Lückbetrieb eine teilweise Entladung von C_2 über L_3 und D_3 zu verhindern.

Eine Schaltung des Grundelementes für erweiterten Stellbereich zeigt Fig. 15.

Einer Schaltung entsprechend Fig. 14 wird ein weiterer Thyristor T_3 nachgeschaltet. Aus dem Spannungsimpuls am Ausgang des ursprünglichen Grundelementes kann T_3 einen beliebig kleinen Teil ausschneiden. Selbst bei hohen Arbeitsfrequenzen von einigen 100 Hz wird der Stellbereich auf diese Weise bis zu 1 : 200 ausgedehnt. Der Widerstand R_5 ist so zu bemessen, dass auch bei gesperrtem Thyristor T_3 der Haltestrom des Thyristors T_1 fließen kann und die erstmalige Ladung von C_2 sichergestellt wird. Auf diese Weise wird das ungewollte Löschen von T_1 verhindert. Die Anforderungen an den Thyristor T_3 werden bei dieser Schaltung auch bei sehr hohen Taktfrequenzen so weit reduziert, dass Leistungsthyristoren mit gewissen Anforderungen an das Einschaltverhalten eingesetzt werden können. Der Mehraufwand an Thyristoren durch die Serieschaltung wird also teilweise aufgehoben durch die Möglichkeit, konventionelle Leistungsthyristoren einzusetzen.

Dies sind nur ein paar Beispiele aus einer Vielzahl von Möglichkeiten; sie sollen aber zeigen, wie durch relativ einfache Schaltungsänderungen das Zerkhacker-element den jeweiligen Anforderungen angepasst werden kann.

2.2 Gleichstromstellerschaltungen

Mit dem Zerkhackergrundelement steht nun ein Schaltungselement zur Verfügung, das beliebig in den Leit- oder Sperrzustand gebracht werden kann. Im folgenden soll gezeigt werden, wie dieses Schaltungselement in Gleichstromstellerschaltungen eingesetzt werden kann. Zuerst sei aber in Fig. 16 der wesentliche Unterschied zur klassischen Gleichstromtechnik aufgezeigt.

In der klassischen Lösung wird die Verbraucherspannung durch Vorwiderstände zur Last reguliert. Einer Einstellung der Vorwiderstände entspricht bei konstantem Laststrom eine über die Zeit konstante Verbraucherspannung. Bei der Gleichstromstellerlösung werden nur bestimmte Portionen der Quellen- oder Netzspannung periodisch auf den Verbraucher geschaltet. Die Verbraucherspannung setzt sich aus Spannungsimpulsen zusammen, die in ihrer Amplitude der Netzspannung entsprechen, deren Breite und Frequenz jedoch vom Zerkhacker bestimmt werden [10].

Die beiden typischen Zerkhacker-schaltungen zeigt Fig. 17.

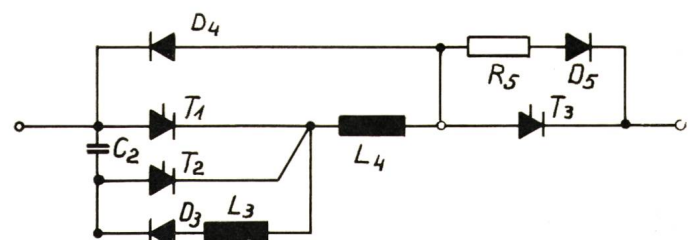


Fig. 15

Schaltung eines Zerkhackergrundelementes für erweiterten Stellbereich

T_3 Hilfsthyristor; R_5 Haltestromwiderstand

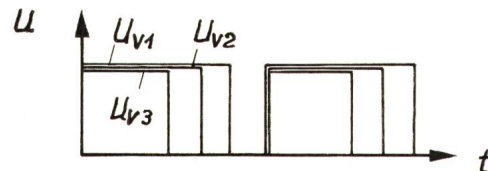
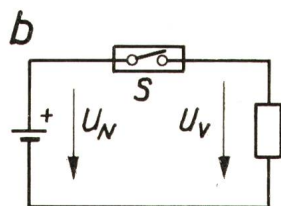
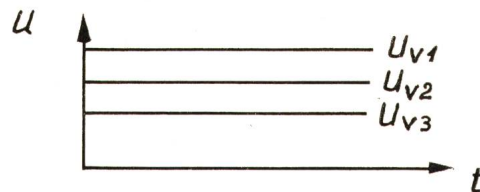
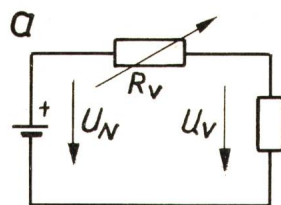
Weitere Bezeichnungen siehe Fig. 13 und 14

Fig. 16
Zwei grundsätzliche Möglichkeiten zum Regulieren einer Gleichspannung

a konstante Speisespannung

b Zerhacken der Gleichspannung durch einen Schalter

U_N konstante Speisespannung; U_V variable Verbraucherspannung; R_V variabler Vorwiderstand; S Schalter; 1, 2, 3 Indizes für verschiedene Einstellungen oder Schaltzustände



Jede Gleichstromstellerschaltung besteht aus, wie angedeutet, einem Längs- und einem Querkreis, wobei ein Kreis das Zerkackergrundelement enthalten muss. Durch Variieren der auf die Periodendauer bezogenen Leitdauer s kann dann die Ausgangsspannung verändert werden. Mit Schaltung a kann jede Spannung eingestellt werden, die kleiner ist als die Netzspannung. Ist das Grundelement leitend, liegt an der Last die Quellenspannung, und das Grundelement führt den Laststrom. Ist das Grundelement gesperrt, so übernimmt die Diode im Querkreis den gesamten Laststrom, und die Spannung an der Last ist Null.

Mit Schaltung b können an der Last Spannungen eingestellt werden, die höher sind als die Quellen- oder Netzspannung. Während der Leitdauer des Grundelementes wird die Last kurzgeschlossen, und der Strom i_2 ist Null. Ist das Grundelement gesperrt, so wird der Strom i_1 durch die Induktivität in die Last gezwungen, und i_2 hat damit die gleiche Grösse und den gleichen Verlauf wie i_1 . Glättungselemente LC am Eingang bzw. Ausgang der Gleichstromstellerschaltung dienen zur Glättung der Ströme im Netz und in der Last. Wie schon erwähnt, erfolgt die Regulierung leistungslos, wie dies auch aus dem Zusammenhang nach Fig. 18 zwischen U_V/U_N und I_V/I_N ersichtlich ist.

Weiter zeigt die Figur Spannungs- und Stromverläufe für je eine Einstellung der beiden Schaltungen. Es sei noch kurz erwähnt, dass die Schaltung a die typische Fahrschaltung, Schaltung b die typische Rekuperationsschaltung in der Traktionstechnik ist.

Wie schon gesagt, ist das Einschaltverhältnis s (Leitdauer/Periodendauer) massgebend für die Grösse der Ausgangsspannung. Die Variation von s erfolgt entweder über

die Veränderung der Leitdauer bei konstanter Arbeitsfrequenz (Breitensteuerung) oder über die Veränderung der Arbeitsfrequenz bei konstanter Einschaltzeit (Frequenzsteuerung). Fig. 19 zeigt die beiden Möglichkeiten. Selbstverständlich sind auch Kombinationen zulässig, wenn auch nicht immer vorteilhaft.

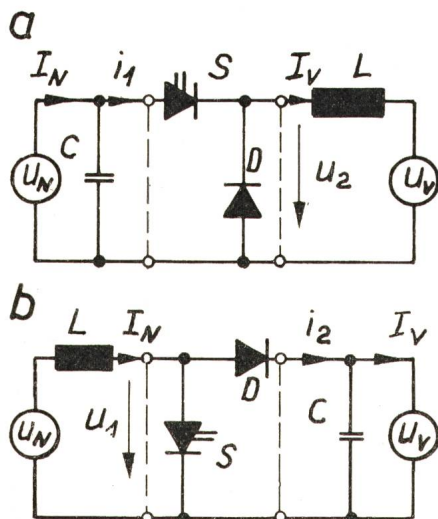
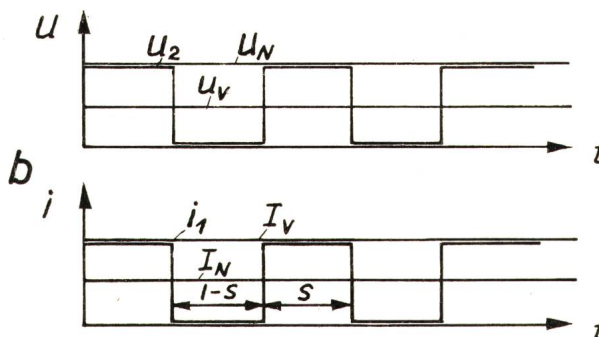
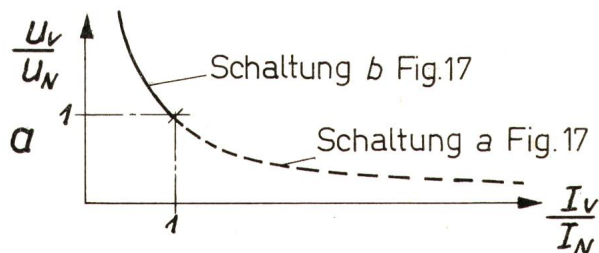


Fig. 17
Die Gleichstromstellerschaltung

a mit dem Grundelement S im Serienschaltkreis
b mit dem Grundelement S im Parallelschaltkreis

S Zerkackergrundelement; D Freilauf- bzw. Sperrdiode; L, C Glättungselemente;
 U_N konstante Netzspannung; U_V variable Verbraucherspannung

Indizes 1, 2 siehe Fig. 18

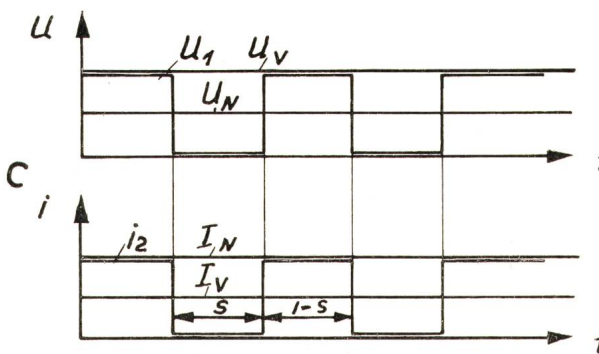


Fig. 18
Zusammenhang zwischen den wichtigsten Spannungen und Strömen der Stellergrundschaltungen nach Fig. 17 und deren zeitlicher Verlauf
a Verwendungsbereich der Schaltungen nach Fig. 17
b Verlauf von Strömen und Spannungen nach Fig. 17a
c Verlauf von Strömen und Spannungen nach Fig. 17b
 s auf die Periodendauer bezogene Leitdauer des Grundelementes

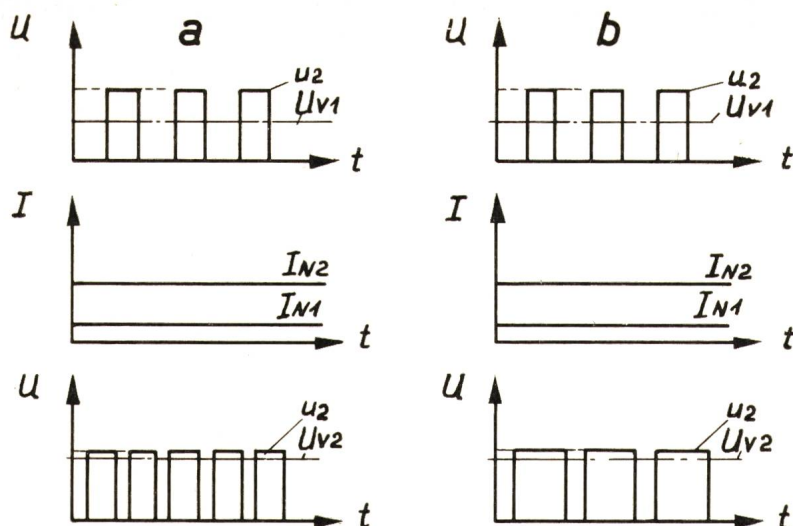


Fig. 19
Mögliche Arbeitsweisen eines Gleichstromstellers
a Frequenzsteuerung (konstante Einschaltzeit)
b Breitensteuerung (konstante Arbeitsfrequenz)
N Netz; V Verbraucher; 1, 2 verschiedene Aussteuergrade
Spannungen und Ströme entsprechend Fig. 17

2.3 Sonderschaltungen

Die Gleichstromstellergrundsaltungen erfüllen nicht immer alle gestellten Forderungen, und so wird es notwendig, sie für bestimmte Anwendungsfälle weiter auszubauen oder zu modifizieren.

Die zusätzlichen Anforderungen kommen einerseits vom Motor, wie z. B. der Wunsch nach Feldschwächung oder kleinem Oberschwingungsgehalt, oder aber von der Netzseite, wo ebenfalls die Forderung nach kleinem Oberschwingungsgehalt im Vordergrund steht.

Zuerst soll eine Sonderschaltung mit automatisch einsetzender Feldschwächung gezeigt werden, wobei die Hauptschlusscharakteristik des Motors voll erhalten bleibt. Diese Lösung ist besonders dort interessant, wo Fahrzeuge mit

Widerstandssteuerungen auf Gleichstromsteller umgebaut werden. Die Motoren solcher Fahrzeuge haben ihren Nennbetriebspunkt gewöhnlich bei niedrigen Geschwindigkeiten, um möglichst oft im Feldschwächebereich zu arbeiten und so die Verluste in den Vorwiderständen zu vermeiden. Nach Fig. 20 wird das Feld nicht direkt in Serie mit dem Motor geschaltet, sondern in Serie mit der Freilaufdiode D_1 . Eine weitere Freilaufdiode D_2 über dem Feld stellt sicher, dass auch bei leitendem Grundelement ein dem Hauptstrom entsprechender Feldstrom weiterfließen kann. In der Nähe der Vollaussteuerung wird der Hauptstrom vom Freilaufkreis nicht mehr voll übernommen, so dass im Feldkreis automatisch der Feldstrom ohne Zusatzeinrichtungen abgeschwächt wird [11].

Eine ganze Gruppe von Sonderschaltungen, nämlich die mehrpulsigen Gleichstromsteller, dient dem alleinigen Zweck, Oberschwingungen auf Netz- und/oder Motorseite klein zu

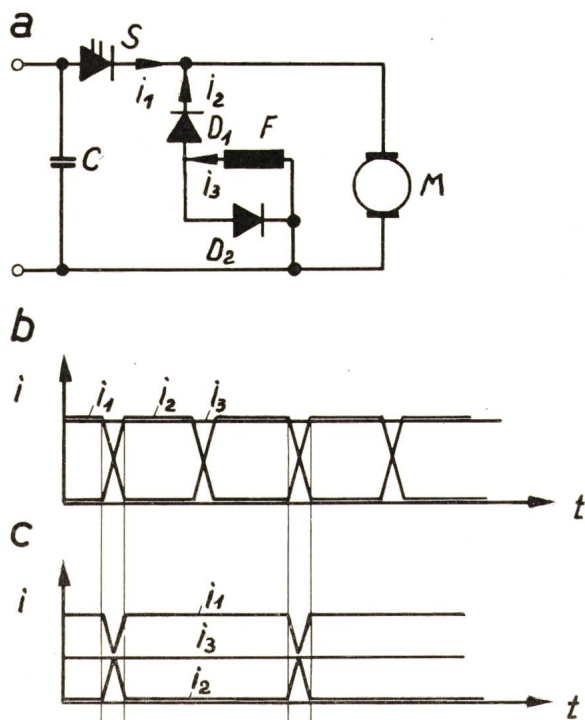


Fig. 20
Automatische Feldschwächung

Schaltenschema (a), Verlauf der Ströme für Normalbetrieb (b) und im Feldschwächebereich (c)
C Eingangskapazität; S Zerschackergrundelement; D_1 Freilaufdiode; D_2 Feldfreilaufdiode; F Motorfeld; M Motorrotor; i_1 Strom im Grundelement; i_2 Strom im Freilauf; i_3 Strom im Feld; t Zeit

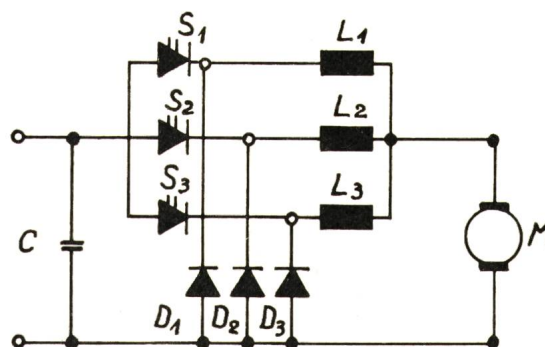


Fig. 21
Beispiel einer mehrpulsigen Schaltung

C Eingangskondensator; $S_{1, 2, 3}$ Zerschackergrundelemente; $D_{1, 2, 3}$ Freilaufdioden; $L_{1, 2, 3}$ Kreisstromdrosselspulen; M Motor

halten. Die einfachste Methode zur Reduktion der Oberschwingungen wäre die Vergrößerung der Filterkreise. Kosten und Volumen werden hier sehr bald prohibitiv sein. Eine Möglichkeit, Oberschwingungen auf Netz- und Motorseite ausreichend klein zu halten, ist ein Betrieb mit hoher Taktfrequenz (bis 1500 Hz), wie es nach Fig. 15 auch möglich ist. Allerdings werden bei sehr grossen Leistungen (ab ca. 1 MW) zusätzliche Induktivitäten (vor allem aus Schutzgründen) in Reihe zu den Maschinen erforderlich, so dass unter Ausnutzung dieser Induktivitäten mehrpulsige Chopperschaltungen vorteilhaft sind [12]. Bei gleichbleibender Arbeitsfrequenz eines Einzelstellers wird die Oberschwingungsfrequenz für Netz und Motor dadurch erhöht, dass die Einzelsteller phasenverschoben angesteuert werden. Das Prinzip eines dreipulsigen Stellers zeigt Fig. 21.

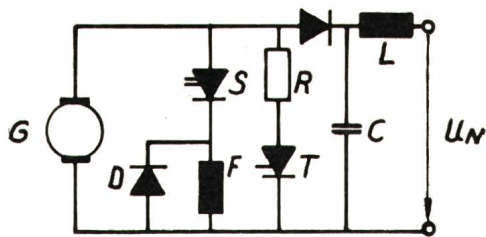


Fig. 22

Beispiel einer Rekuperationsschaltung mit Feldschwächung und Erhaltung der Bremskraft beim Bügelspringen

G Rotor des Generators; *F* Feld des Generators; *S* Zenerhackergrundelement; *D* Freilaufdiode des Feldes; *R* Bremswiderstand; *T* Hilfsthyristor; *L*, *C* Netzfilter; U_N Netzspannung

In Serie zu jedem Stellerzweig ist eine Drosselspule geschaltet, welche den Strom auch während der Sperrphase des Zenerhackergrundelementes weiterführt. Das Zenerhackergrundelement ist über die Freilaufdiode mit dem negativen Pol der Speisespannung verbunden. Die Spannung am Ausgang der Gesamtschaltung hängt damit vom Teilverhältnis der Induktivitäten ab. Solange der Strom in den einzelnen Drosselspulen nicht lückt, sind die einzelnen Steller parallelgeschaltet und der Gesamtstellbereich entspricht dem Stellbereich der einzelnen Steller. Im lückenden Betrieb jedoch schaltet jeder Steller unabhängig von den anderen einen Spannungsimpuls auf die Last, wobei sich die einzelnen Spannungsimpulse addieren und der Stellbereich wieder stark reduziert wird. Die Anforderungen an den Stellbereich bei Schwachlast bestimmen also die Auslegung der Drosselspulen.

Auch hier muss gesagt werden, dass eine beliebige Vergrößerung der Pulszahl nicht wirtschaftlich ist. Kleinere Filterkosten werden bald einmal kompensiert durch zusätzliche Gestell- und Verkabelungskosten. Für eine Nennleistung von ca. 7 MW scheint z. B. eine 6-bis 8pulsige Lösung optimal.

Abschliessend sollen einige Sonderschaltungen für den Bremsbetrieb vorgestellt werden. Schon früher wurde die Stellergrundschialtung mit dem Zenerhacker-element im Parallelzweig (Fig. 17b) als die typische Rekuperationsschaltung vorgestellt. Die charakteristische Forderung für den Rekuperationsbetrieb ist die Erhaltung der Bremskraft, wenn, z. B. durch Bügelspringen, die Verbindung Fahrzeug-Netz unterbrochen ist. Ein Bremswiderstand *R*, der durch einen zusätzlichen Thyristor *T* nach Fig. 22 zugeschaltet wird, muss unter diesen Umständen die Bremsleistung übernehmen können. Wird die Verbindung mit dem Netz wieder hergestellt, verhindert eine Diode die Rückspeisung aus dem Netz auf den Bremswiderstand. Durch kurzzeitiges Zurücknehmen des Bremsstromes kann der Hilfsthyristor *T*, der den Bremswiderstand zugeschaltet hat, gelöscht werden, und der normale Rekuperationsbetrieb wird wieder aufgenommen. Das Beispiel zeigt, dass Bügelspringen in der Gleichstrom-

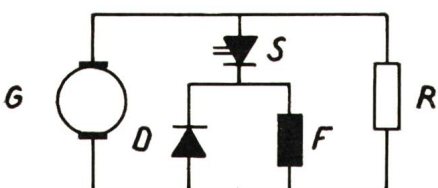


Fig. 23

Beispiel einer Widerstandsbremschaltung mit Feldschwächung

G Rotor des Generators; *F* Feld des Generators; *S* Zenerhackergrundelement; *D* Freilaufdiode des Feldes; *R* Bremswiderstand

traktion ein wesentlich kleineres Problem darstellt als in der Wechselstromtraktion.

Selbstverständlich ist mit der Gleichstromstellertechnik auch direkte Widerstandsbremung möglich. Es können dafür verschiedenste Schaltungsvarianten mit dem Zenerhacker-element sowohl im Serie- wie auch im Parallelkreis eingesetzt werden. Aus der Vielzahl der Möglichkeiten sei eine Schaltung herausgegriffen, Fig. 23, die mit einer Hauptschlussmaschine ein Abbremsen bis nahezu zum Stillstand erlaubt. Bei hohen Drehzahlen wird vorerst über den Chopper der Erregergrad eingestellt. Nach Gleichwerden von Anker- und Erregerstrom wird mit weiterer Aussteuerung des Choppers der für den Anker wirksame Bremswiderstand verkleinert, bis schliesslich reine Kurzschlussbremung vorliegt.

Gleichstromstellerschaltungen für den Widerstandsbremsbetrieb gibt es in grosser Anzahl, und bei der Wahl der endgültigen Lösung muss nicht zuletzt berücksichtigt werden, wie leicht sich eine Bremsschaltung aus einer vorgegebenen Fahrtschaltung durch Umgruppierung der einzelnen Elemente aufbauen lässt.

3. Schlussbemerkungen

Mit voller Absicht beschränken sich diese Ausführungen auf das Darstellen und Erläutern bekannter und eingeführter Schaltungen für Stromrichter und Steller bei Bahnan-

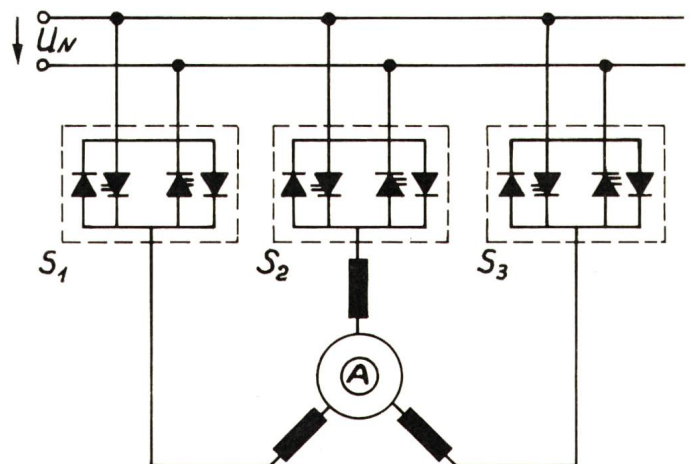


Fig. 24

Stromrichter gespeister Asynchronmotor

A Asynchronmotor; $S_{1...3}$ Wechselrichter/Phase; U_N Gleichspannung ab Fahrdrabt oder Gleichrichter

wendungen. Auf die vielen anderen Möglichkeiten, welche die Leistungselektronik bietet, kann nicht näher eingegangen werden: lediglich der thyristorgespeiste Asynchronmotor soll kurz erwähnt werden, da ihm möglicherweise eine grosse Zukunft bevorsteht, da ein Asynchronmotor wesentlich einfacher (Kollektor), robuster und billiger ist. Die Phasenspannungen des Motors werden gebildet, indem gemäss Fig. 24 die einzelnen Phasen abwechselnd an die positive bzw. negative Seite der Speisespannungsquelle (Gleichspannungsnetz oder gleichgerichtete Wechselspannung) gelegt werden. Das Schalten selbst wird durch eine dem Chopper ähnliche Leistungselektronik durchgeführt. Durch eine sinusförmige Steuerung der Pulsbreiten kann eine im Mittel sinusförmige (dreiphasige) Wechselspannung gebildet werden

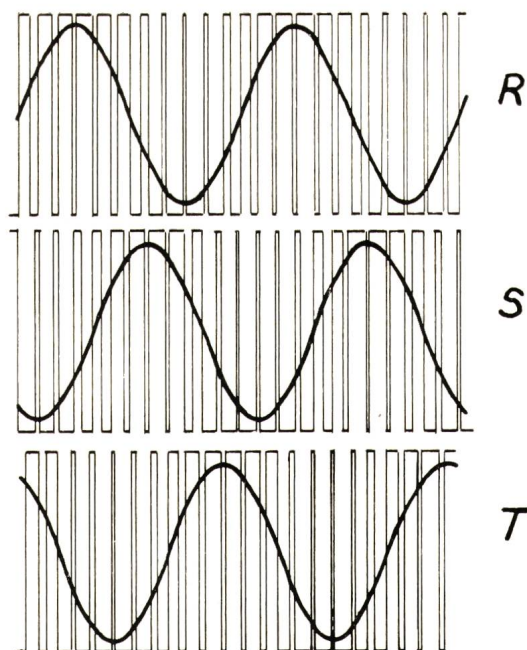


Fig. 25
Steuerung der Phasenfolge eines dreiphasigen Spannungssystems

(Fig. 25), welche sowohl in ihrer Amplitude als auch in ihrer Frequenz verändert werden kann [13].

Trotz dieser Beschränkung konnte sowohl im Wechsel- wie auch im Gleichspannungsteil nur das Allerwesentlichste gezeigt und kaum auf sicher interessante Details eingegangen werden. Die Autoren hoffen aber, trotzdem einen Eindruck gegeben zu haben, warum sich diese Technik so schnell eingeführt hat und welche Möglichkeiten für die Zukunft noch in ihr stecken. Die wachsende Einheitsleistung der Thyristoren und die Verbesserung besonders der dynamischen Parameter werden das ihre dazu beitragen. Der endgültige Durchbruch der Leistungselektronik im Traktions-

sektor wird dann erfolgen, wenn das Problem der elektromagnetischen Kompatibilität mit Systemen der Nachrichtenübermittlung und des Signalwesens, die besonders bei der Wechselstromtraktion im Vordergrund stehen, befriedigend gelöst worden ist. Dies kann aber nur erreicht werden, wenn die Fachleute aller beteiligten Fachgebiete eng und offen zusammenarbeiten und damit die Gewähr gegeben ist, dass das Endresultat wirtschaftlich annehmbar ist.

Abschliessend möchte ich meinen Dank unseren Bahnverwaltungen aussprechen, die, im vollen Bewusstsein aller Probleme, sich immer bereitgefunden haben, die neue Technik auf ihren Strecken einzusetzen.

Literatur

- [1] E. Gerecke: Die moderne Elektronik und ihre Anwendungen in der elektrischen Zugförderung. ETZ-A 88(1967)15, S. 358...363.
- [2] H. C. Skudelny: Stromrichterschaltungen für Wechselstrom-Triebfahrzeuge. ETZ-A 86(1965)8, S. 249...259.
- [3] R. Buckel: Oberschwingungen im Fahrleitungsnetz von Wechselstrombahnen. ETZ-A 88(1967)17, S. 429...434.
- [4] R. Fischer und G. Scholtis: Die thyristorgesteuerte Nutzbremse im Triebwagen ET 45.01 der Deutschen Bundesbahn. Elektrische Bahnen 39(1968)6, S. 136...141 + Nr. 7, S. 154...161.
- [5] K. Winkler: Ausserordentliche Betriebszustände in gesteuerten Einphasen-Gleichrichterschaltungen und Massnahmen zu deren Vermeidung. Brown Boveri Mitt. 56(1969)11/12, S. 589...596.
- [6] E. Kocher, E. Isler und A. Fehr: Die Gleichrichter-Lokomotiven Ae 4/4 II Nr. 261 und 262 der Berner Alpenbahn-Gesellschaft Bern-Lötschberg-Simplon (BLS). Brown Boveri Mitt. 52(1965)9/10, S. 661...679.
- [7] 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.
- [8] K. Heumann und C. Stumpe: Thyristoren. Eigenschaften und Anwendungen. Stuttgart, Teubner, 1969.
- [9] P. Knapp: Der Gleichstromsteller zum Antrieb und Bremsen von Gleichstromfahrzeugen. Brown Boveri Mitt. 57(1970)6/7, S. 252...270.
- [10] H. Löcker: Elektronische Steuerung von Gleichstromtriebmotoren. Techn. Rdsch. 61(1969)35, S. 29...33.
- [11] P. Knapp und H. Löcker: Stromsteller für Gleichstrom-Triebfahrzeuge. E und M 85(1968)3, S. 110...117.
- [12] J. P. Pauwels und M. Squilbin: Der elektronische Zerkacker. Monatschrift der internat. Eisenbahn-Kongress-Vereinigung, Kybernetik und Elektronik bei den Eisenbahnen 6(1969)3, S. 89...110.
- [13] A. Schöning und H. Stemmler: Geregelter Drehstrom-Umkehrantrieb mit gesteuertem Umrichter nach dem Unterschwingungsverfahren. Brown Boveri Mitt. 51(1964)8/9, S. 555...577.

Adresse der Autoren:

H. J. Bossi, H. Löcker und K. Winkler, AG Brown, Boveri & Cie., 5401 Baden.