Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke

Band: 53 (1962)

Heft: 7

Artikel: Der gegenwärtige Stand der Quecksilberdampf-Stromrichter

Autor: Wasserrab, Th.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-916920

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: 15.12.2025

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

Der gegenwärtige Stand der Quecksilberdampf-Stromrichter [1])

Von *Th. Wasserrab*, Baden

621.314.65

Anlässlich des 50jährigen Jubiläums der Quecksilberdampf-Stromrichter mit Stahlgefäss wird nach einem kurzen Rückblick eine Übersicht über den gegenwärtigen Stand und die zukünftigen Aussichten dieser Technik gegeben. Es wird festgestellt, dass sich diese Gasentladungs-Ventile derzeit in einer intensiven Weiterentwicklung befinden und in der Zukunft bevorzugt dort Verwendung finden werden, wo ihre hervorragenden Steuereigenschaften voll zur Geltung kommen.

A l'occasion du 50e anniversaire du mutateur à vapeurs de mercure en cuve d'acier, on donne, après une courte récapitulation, un aperçu sur l'état actuel et les perspectives futures de cette technique. On constate ensuite que les soupapes à décharge gazeuse se trouvent maintenant en pleine évolution et qu'elles trouveront à l'avenir des utilisations préférentielles partout où leurs excellentes qualités de régulation se manifestent d'une manière très efficace.

Ein Bericht über Quecksilberdampf-Stromrichter darf gegenwärtig aus mehreren Gründen vermehrtes Interesse beanspruchen.

Zuerst ist ein rein historischer Grund zu erwähnen: Im Jahre 1911 wurde in der Eisengiesserei Mack in Rödelheim bei Frankfurt a. M. der erste Quecksilberdampfgleichrichter mit Stahlgefäss, eine Entwicklung von *Benö Schäfer*, in Betrieb genommen [1] [2]). Man kann also in diesem Jahre auf ein halbes Jahrhundert dieser interessanten Technik zurückblicken. Ein zweiter technisch-wissenschaftlicher Grund ist dadurch gegeben, dass die Erforschung der physikalischen Grundlagen so weit geführt werden konnte, dass für die Projektierung von Stromrichteranlagen heute zuverlässige und bewährte Richtlinien vorliegen. Der dritte und letzte Grund betrifft die Zukunft. Der rasch zunehmende Einsatz von Halbleiterventilen, insbesondere für die Speisung von Elektrolysen, hat die Frage nach der zukünftigen Anwendung von Quecksilberdampf-Stromrichtern stark in den Vordergrund gerückt. Es sollte daher eine Betrachtung über die modernsten Anwendungen eine Prognose über die voraussichtliche Weiterentwicklung erleichtern.

Damit sind drei interessante Aspekte gefunden, um den zu erörternden Gegenstand von mehreren Seiten beleuchten zu können und trotz der Kürze der Darstellung ein zutreffendes Bild sowohl von der Vielfalt und Schwierigkeit der Probleme als auch von dem Rang der gewonnenen Erkenntnisse und Lösungen zu erhalten.

1. Konstruktiver Rückblick

Wenn man heute auf die frühen Anfänge dieser Technik zurückblickt, so ist es schwer, die damaligen technologischen Schwierigkeiten auch nur zu ahnen. Folgende Begebenheit möge die damalige Situation blitzartig beleuchten: als *Schäfer* zu Brown Boveri in die Schweiz übersiedelte, wurden die Quecksilberdampfgleichrichter zuerst der Dampfturbinenabteilung angegliedert — so wenig Verwandtes zeigte anfangs dieser Apparat mit den elektrischen Maschinen. Alle, die mit dem Gleichrichter damals zu tun hatten, berichten übereinstimmend von den ungewöhnlichen Schwierigkeiten, die nur durch geduldige Untersuchung der physikalischen Grundlagen und eine gesunde Mischung von Intuition und praktischem Sinn weiterentwickelt werden konnten [2].

Es kann festgestellt werden, dass gewisse gemeinsame, vorzugsweise äusserliche Merkmale während etwa 25 Jahren fast unverändert beibehalten wurden. Immerhin ist in diesem Intervall *ein* bedeutender Fortschritt zu erwähnen: die Einführung der Gitter mit der Mehrfachfunktion von Steuerung des Zündzeitpunktes, Sperrung bei Kurzschluss und Verbesserung der Entionisierung. Die dadurch ermöglichte Leistungssteigerung pro Anode wurde besonders deutlich sichtbar, als man die Entwicklung zu hohen Spannungen durchführte, welche 1939 mit der bekannten Energieübertragung mit 50 kV Gleichspannung von Wettingen nach Zürich ihren ersten Höhepunkt fand. Fig. 1 und 2 zeigen zwei derartige Gefässe, jedes mit 6 Anoden und Vakuumpumpen: mit Wasserkühlung für die Übertragung Wettingen—Zürich [3] und mit Luftkühlung für den Grossversuch in Bodio [4]. Es ist nun recht bemerkenswert, dass in den Jahren 1935 bis 1940 an diesem Stammbaum der Stromrichtergefässe gleich zwei neue Entwicklungsäste ansetzen: die pumpenlosen Gefässe, die in Europa vorzugsweise luftgekühlt ausgeführt werden, und die Einanodengefässe. Zu den pumpenlosen Gefässen sei bemerkt, dass es natürlich nicht heissen soll, dass unvermittelt das bis anhin so erfolgreiche Prinzip der Vakuumhaltung mit dauernd in Betrieb befindlichen Vakuumpumpen völlig erledigt gewesen sei — es hat sich vielmehr für gewisse Zwecke bis heute gehalten. Zum Beweise dieser Koexistenz zeigt Fig. 3 moderne luftgekühlte, 6anodige Gefässe, die bei kleinen Leistungen pumpenlos, bei grösseren Leistungen mit Vakuumpumpe ausgeführt werden. Das abgeschweisste Gefäss liegt zwar in der Richtung der all-

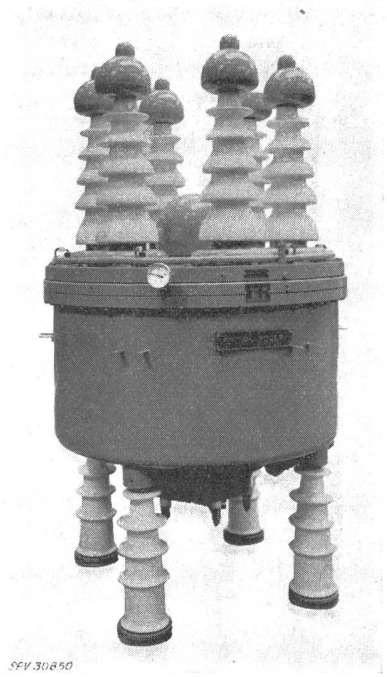

Fig. 1
Stromrichtergefäss der Gleichstrom-Hochspannungsübertragung Wettingen—Zürich (1939)
geprüft bis 50 kV, 30 A

[1]) Nach einem Vortrag, den der Verfasser am 9. Februar 1961 am Ausseninstitut der Technischen Hochschule in Wien gehalten hat.

[2]) Siehe Literatur am Schluss des Aufsatzes.

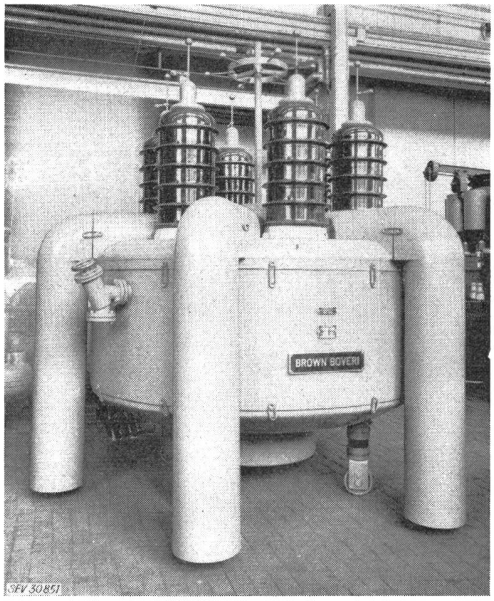

Fig. 2
Stromrichtergefäss der Hochspannungs-Versuchsanlage im Kraftwerk Biaschina der Aare-Tessin-AG in Bodio (1944)
(33 kV, 400 A)

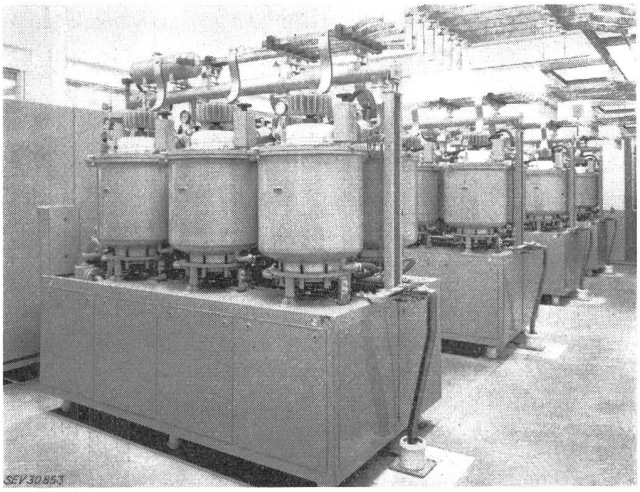

Fig. 4
Einanodengefässe der Stromversorgungsanlage des Europäischen Kernforschungszentrums, CERN, Genf, für die Speisung des Magneten des Protonensynchrotrons

gemeinen technischen Entwicklung zu immer grösserem Komfort, so dass das für den Verbraucher bequemere pumpenlose Gefäss wohl das endgültige Entwicklungsziel darstellt, vorläufig werden aber Gefässe für sehr hohe Leistungen immer noch mit Vakuumpumpen ausgerüstet, deren Weglassung in Gedanken sehr einfach, in Wirklichkeit aber wohl erst nach weiteren Fortschritten der Vakuumtechnologie durchzuführen sein wird [5].

Ähnliches gilt für die Alternative Einanoden—Mehranodengefäss. Auch hier bestehen beide Lösungen nebeneinander. Fig. 4 zeigt Einanodengefässe für sehr grosse Dauerleistung, daher mit Wasserkühlung und Vakuumpumpe, über deren praktische Anwendung später noch berichtet werden wird. Hier ist die Bemerkung angebracht, dass heute in allen Ländern Gefässe mit fast allen Eigenschaftspermutationen gebaut werden. Bei den Einanodengefässen mit Luftkühlung ist neuerdings ein sehr bemerkenswerter Fortschritt zu verzeichnen: die Entwicklung von Einanodengefässen mit grosser Stossbelastbarkeit aus dem kalten Zustand heraus, welche Eigenschaft dringend insbesondere für die Speisung von Walzwerkantrieben benötigt wird. Um diese jüngste Entwicklung richtig einschätzen zu können, seien an Hand von Fig. 5 die bisherigen Verhältnisse gezeigt. Zuerst erkennt man deutlich die Notwendigkeit einer genauen Temperaturkontrolle bei gepumpten Gefässen. Man sieht sodann, welcher Fortschritt durch den Übergang zum abgeschmolzenen Gefäss mit Edelgasfüllung erzielt wurde, wobei allerdings bemerkt sei, dass dessen absolute Leistung reduziert werden muss, weil ja die Edelgasfüllung im allgemeinen einer Kontrolltemperaturerhöhung von 30...50 °C entspricht. In Fig. 5 ist daher ein relativer Strommassstab verwendet worden. Auch sonst bewirkt die Edelgasfüllung einige Besonderheiten im Verhalten, so dass nicht nur Vorteile entstehen. Insbesondere wurde es für viele Zwecke als unbequem empfunden, dass bei niedrigen Temperaturen nur wenig mehr als der Nennstrom eingeschaltet werden darf. Hier hat nun der neueste Entwicklungsschritt dazu geführt, dass der 3fache Nennstrom schon bei 10...15 °C, allerdings nur für kurze Belastungspulse von einigen Sekunden Dauer, ohne die geringste Andeutung von Ionenverarmung geführt werden kann. Damit ergaben sich erfreuliche Vorteile für die Projektierung: Der Gefässaufwand wird nicht mehr wie früher durch die verlangten Spitzenströme, sondern durch den arithmetischen Mittelwert bestimmt, und der Quecksilberdampf-Stromrichter ist in bemerkenswerter Weise temperaturunempfindlicher und wirtschaftlicher geworden, so dass neue, höchst interessante Anwendungen erschlossen werden konnten [6].

Zum Schluss sei noch die gegenwärtige Situation bei den Höchstspannungsgefässen erwähnt. Auch hier zeigt

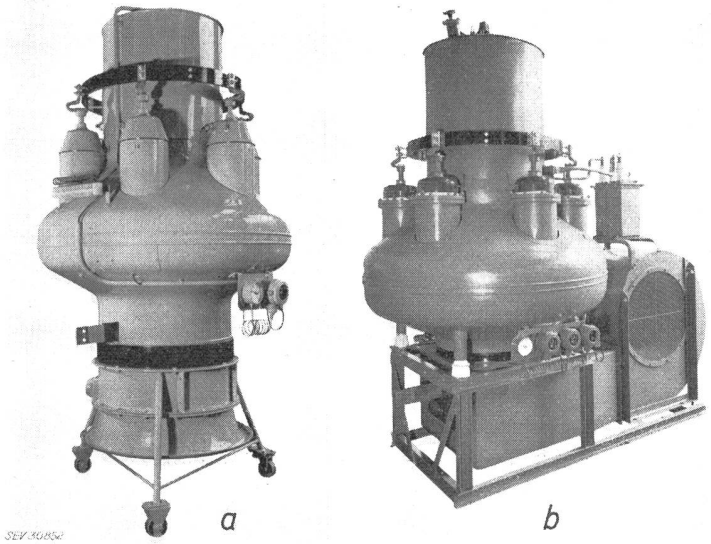

Fig. 3
Luftgekühlte Stromrichtergefässe
a pumpenlos, für 1250 A; *b* mit Vakuumpumpe, für 2500 A

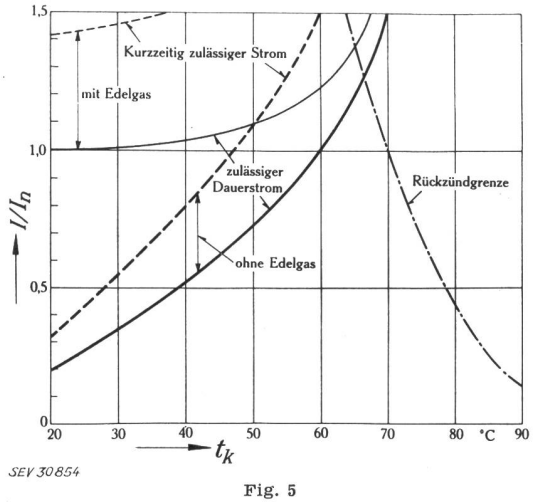

Fig. 5

Zulässiger Gleichstrom I, bezogen auf den Nennstrom I_n, in Abhängigkeit von der Kontrolltemperatur t_k

sich keine einheitliche Lösung. Die Firma Almänna Svenska baut mehranodige Gefässe: für die Gotland-Übertragung zweianodig, für die Kanalübertragung vieranodig mit Luftkühlung, und die USSR baut Einanodengefässe mit Ölkühlung der Kondensationsflächen und Verdampfungskühlung der Anode — beide jedoch mit Vakuumapparatur. Diese Gefässe sind übrigens auch elektrisch nach ganz verschiedenen Prinzipien entwickelt worden und nehmen sich neben den Niederspannungs-Ausführungen mit ihrer Höhe von etwa 3,5 m und einem Gewicht von 2 t geradezu gigantisch aus.

2. Die Belastbarkeit der Quecksilberdampf-Stromrichter

Die elektrische Belastbarkeit von Quecksilberdampf-Stromrichtern ist dadurch gekennzeichnet, dass bei der Überschreitung der Nennleistung die Zahl der Kommutierungsrückzündungen sehr stark zunimmt. Die Bestimmung der Leistungsgrenze reduziert sich daher in vielen Fällen auf eine Untersuchung über die physikalischen Voraussetzungen für das Auftreten von Rückzündungen im Löschzeitpunkt. Phänomenologisch handelt es sich um den Übergang aus dem unselbständigen Nachstrom in eine selbständige Bogenentladung, welcher Übergang in sehr kurzer Zeit, nach Beobachtungen von *J. Slepian* und *L. R. Ludwig* in Bruchteilen von Mikrosekunden, in einer Art Kippvorgang erfolgt. Als massgebliche Grösse für die Entstehung einer Rückzündung wurde auf Grund verschiedener Beobachtungen ein von der Anode emittierter Elektronenstrom kritischer Grösse ($\approx$ 0,1 A) gefunden, u. a. weil bekanntlich eine Bogenentladung nur oberhalb eines Minimalstromes von dieser Grössenordnung existieren kann. Ermittelt man ausgehend von diesen Voraussetzungen diejenigen Grössen, welche für das Eintreten von Rückzündungen massgeblich sind, so erhält man eine Anzahl von Variablen, die man zweckmässig in zwei Kategorien unterteilt:

1. Sog. Schaltungsgrössen, wie Anodenstrom i, Sperrspannung u, Stromänderung di/dt, welche nur von der gewählten Schaltung und der Belastung abhängen;
2. Sog. Gefässgrössen, wie Sattdampftemperatur, Gittergeometrie, Nachstromzeitkonstante, welche von der Konstruktion und Kühlung des Gefässes abhängen.

Mit den erstgenannten Grössen kann man die sog. Sperr-Beanspruchung der Anode definieren, während die zuletzt genannten Grössen das Sperrvermögen, die Belastbarkeit des Gefässes bestimmen.

In Fig. 6a ist der zeitliche Verlauf von Anodenstrom und Anodensperrspannung eines ungesteuerten Gleichrichters graphisch dargestellt. Der Funktion des Gleichrichters entspricht während der Brennzeit eine Stromführung bis zu einem bestimmten Scheitelstrom und während der Sperrzeit eine Sperrung bis zu einem gewissen Höchstwert der Sperrspannung. Im Löschaugenblick sind stets von der vorangegangenen Entladung noch Ladungsträger in der Nähe der Anode vorhanden. Die positiven Quecksilberionen werden von der negativen Anode angezogen und bilden den vorhin erwähnten «Nachstrom». Beim Auftreffen auf der Anodenoberfläche geben sie ihre im Sperrfeld aufgenommene Energie an den Anodengraphit ab und lösen Elektronen aus, welche die Ursache für das Eintreten von Kommutierungsrückzündungen bilden. Obwohl in dem Produkt von Nachstrom und Sperrspannung, welches der elektrischen Sperrbeanspruchung der Anode proportional ist, bereits die physikalisch massgebliche Kenngrösse gefunden ist, eignet sich diese nicht für den praktischen Gebrauch, weil sie eine Verknüpfung einer Schaltungsgrösse (Sperrspannung) und einer Gefässgrösse (Nachstrom) darstellt. Beachtet man jedoch, dass für ein bestimmtes Entladungsgefäss bei konstanter Kontrolltemperatur der Scheitelwert des Nachstromes nur von der Geschwindigkeit abhängt, mit welcher der Anodenstrom während der Kommutierung absinkt, so kann man die Sperrbeanspruchung der Anode B durch das Produkt aus Sprungspannung Δu und Stromänderung im Löschzeitpunkt di/dt darstellen:

$$B = \Delta u \frac{di}{dt}$$

welche damit als reine Schaltungsgrösse erscheint. Dieser rein rechnerischen Grösse wird dann das für jedes Gefäss durch Messung ermittelte Sperrvermögen an die Seite gestellt, welches die Gefässgrössen als Parameter enthält. Das Sperrvermögen oder die Sperrfestigkeit eines Gleichrichters wird offenbar um so

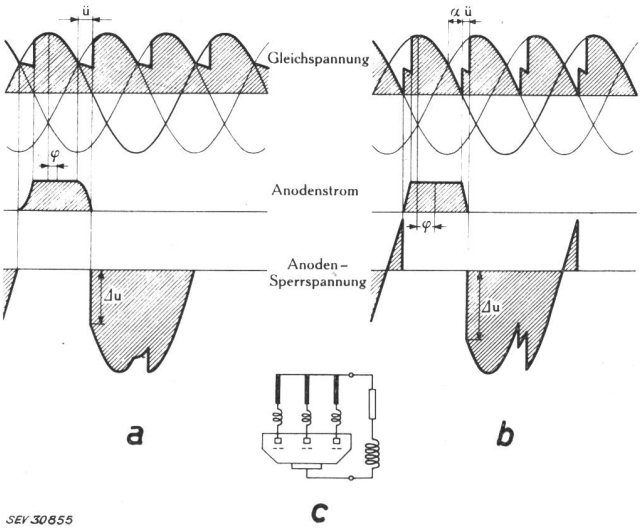

Fig. 6

Zeitlicher Verlauf von Anodenstrom und Sperrspannung für ungesteuerten a und gesteuerten b Betrieb eines Gleichrichters in Dreipulsschaltung c

besser sein, je höhere Spannungen und je grössere Nachströme, d. h. je höhere Sperrbeanspruchungen rückzündungsfrei gesperrt werden können.

Eine genaue Untersuchung dieser Zusammenhänge ergibt die sehr wichtige Feststellung, dass ungesteuerte Gleichrichter eine von der Kommutierungsgeschwindigkeit unabhängige Sperrbeanspruchung haben — mit anderen Worten, die Kurzschlußspannung des Transformators ist beim ungesteuerten Gleichrichter ohne Einfluss auf die elektrische Sperrbeanspruchung. Diese Feststellung ist sofort verständlich, wenn man sich überlegt, dass bei kleiner Kurzschlußspannung eine grosse Stromänderungsgeschwindigkeit, dafür jedoch eine kleine Sprungspannung und bei grosser Kurzschlußspannung eine kleine Stromänderungsgeschwindigkeit, dafür jedoch eine grosse Sprungspannung auftritt. Die Sperrbeanspruchung eines ungesteuerten Gleichrichters wird demnach lediglich der Leistung proportional sein. Sobald jedoch mittels der Gittersteuerung der Zündzeitpunkt der einzelnen Anoden verzögert wird, werden sowohl die Stromänderungen bei der Kommutierung schneller, als auch die Sprungspannungen grösser (Fig. 6b). Die elektrische Sperrbeanspruchung steigt infolgedessen mit zunehmendem Zündverzögerungswinkel an (Fig. 7). Auf der Abszisse der Fig. 7 ist die relative Gleichspannung, d. h. bezogen auf den ungesteuerten Gleichspannungswert — und auf der Ordinate die relative Sperrbeanspruchung, auch auf den Wert im ungesteuerten Betrieb bezogen, dargestellt. Bei voller Aussteuerung ergibt sich für alle Transformator-Kurzschlußspannungen die gleiche Sperrbeanspruchung; beim Nullspannungsbetrieb erreicht sie Maxima, welche sehr stark von der Kurzschlußspannung des Transformators abhängig sind und im Wechselrichterbetrieb nimmt sie wiederum ab. Das Sperrvermögen ist unabhängig von der Anodengrösse. Es ist jedoch von Graphitbeschaffenheit, Ventilgeometrie und Dampfdichte abhängig. Da das Sperrvermögen oder die Sperrfestigkeit eines Gleichrichters bei konstantem Strom eine eindeutige und konstante Grösse ist, die Sperrbeanspruchung aber bei Teilaussteuerung gegenüber dem ungesteuerten Betrieb ansteigt, so muss man, um das Sperrvermögen nicht zu

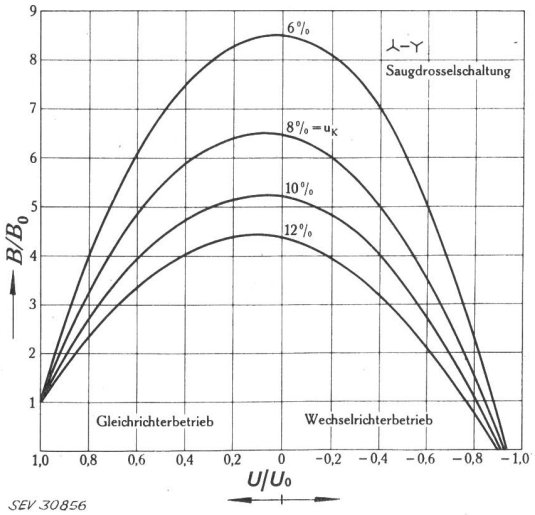

Fig. 7
Abhängigkeit der relativen Sperrbeanspruchung B/B_0 vom Aussteuerungsgrad U/U_0 (gesteuerte Gleichspannung/ungesteuerte Gleichspannung) für verschiedene Transformator-Kurzschlußspannung u_k

überschreiten, die Nennspannung oder den Nennstrom, jedenfalls jedoch die Nennleistung bei Teilaussteuerung gegenüber dem ungesteuerten Betrieb reduzieren. Es ist nach den Kurven in Fig. 7 klar, dass diese Reduktion sehr stark von der Kurzschlußspannung des Transformators und dem Aussteuerungsgrad des Stromrichters abhängig ist. Es sei nachdrücklich empfohlen, bei der Projektierung von Mutatoranlagen stets Transformator und Entladungsgefäss als eine elektrische Einheit aufzufassen. Geeignete Koordinierung ermöglicht optimale Betriebsbedingungen und höchste Betriebssicherheit, während andernfalls ungünstiges Betriebsverhalten der Mutator-Anlage und Rückzündungen infolge elektrischer Überbeanspruchung die Folge sind. Nach dem Erwähnten ist es wohl klar, dass man die elektrische Sperrbeanspruchung von gesteuerten Mutatoren nicht allein mit den Strom- und Spannungsdaten an den Gleichstromklemmen beurteilen kann, sondern stets den Aussteuerungsgrad und die Transformatorimpedanz, die Netzfrequenz und die Schaltung — also eine ganze Reihe von Einflussgrössen — berücksichtigen muss.

Diese 1955 veröffentliche Ableitung der Sperrbeanspruchung [7] hat seither allgemeine Anwendung gefunden und stellt die geeignete Basis für eine zutreffende Vorausberechnung bzw. Projektierung von Stromrichteranlagen dar [3]). Es ist wohl verständlich, wenn in dieser zusammenfassenden Darstellung nur auf das Wichtigste eingegangen und von den verschiedenen Erweiterungen und Ergänzungen [8; 9] nur noch eine erwähnt wird: der Einfluss der Umschaltschwingungen auf die Rückzündungen. Die Umschaltschwingungen und auch die Mittel zu ihrer wirksamen Bedämpfung [10] werden nämlich mit wachsender Betriebsspannung immer einflussreicher und spielen schliesslich bei Höchstspannungsstromrichtern eine entscheidende Rolle. Die Erweiterung der vorerwähnten Rückzünd-Theorie auf Stromrichter mit Umschaltschwingungen [11] führt auf eine zweite Beanspruchungsformel:

$$B = \left(\frac{\mathrm{d}i}{\mathrm{d}t}\right)\left(\frac{\mathrm{d}u}{\mathrm{d}t}\right)$$

welche den zeitlichen Verlauf von Nachstrom und Sperrspannung berücksichtigt und nunmehr auch die Vorausberechnung von Höchstspannungsstromrichteranlagen ermöglicht. Als eine besonders naheliegende Konsequenz folgt aus der Beanspruchungsformel der Nutzen eines Dämpfungsgliedes:

1. Zur Vermeidung des Überschwingens und
2. Zur Abflachung des Anstieges der Sperrspannung.

Von den verschiedenen erwähnten Störungen ist hier nur die Kommutierungs-Rückzündung, als die bekannteste und unangenehmste, behandelt worden. Über die Spannungs-Rückzündungen [12], die Durchzündungen, die Wandzündungen [27] usw. sind ebenfalls experimentelle und theoretische Untersuchungen angestellt worden, deren Ergebnisse z. T. bereits veröffentlicht wurden. Allen diesen Vorgängen ist gemeinsam, dass ihre Entstehung nach statistischen Gesetzen erfolgt, deren Wahrscheinlichkeit mit der sog. Summenformel der Poissonschen Gleichung:

$$W = \mathrm{e}^{-\mu} \sum_{n=\nu}^{n=\infty} \mu^n / n\,!$$

[3]) Der Autor hat selbst wiederholt darauf hingewiesen, dass die Gleichung $B = \Delta u \cdot (\mathrm{d}i/\mathrm{d}t)$ nicht für jede Gefässkonstruktion und nicht unter allen Temperaturbedingungen gilt.

beschrieben werden kann, welche für sehr seltene Erscheinungen durch den einfacheren Ausdruck:

$$W = e^{-\mu} \frac{\mu^n}{n!}$$

ersetzt werden kann.

Fig. 8 zeigt die graphische Auswertung dieser Gleichungen. Auf der Ordinate ist die Wahrscheinlichkeit W und auf der Abszisse die Variable μ, welche der Sperrbeanspruchung B proportional ist, in logarithmischem Maßstab aufgetragen. Der Parameter ν ist dem Sperrvermögen proportional und wird als Gefässqualität bezeichnet. Die Poissonsche Summenformel gibt die Wahrscheinlichkeit an, dass die Variable n, welche den Mittelwert μ besitzt, den Wert ν erreicht oder überschreitet [4]). Diese mathematische Aussage kann für den vorliegenden Fall folgende physikalische Interpretation erhalten: im Mittel wird unter dem Einfluss der mit der Sperrspannung gegen die Anode geschossenen Nachstromionen der Elektronenstrom i ausgelöst, der in Fällen von der Wahrscheinlichkeit W den zur Bogenbildung führenden kritischen Wert $I \approx 0{,}1$ A erreicht. Man erkennt, dass z. B. bei einer mittleren Gefässqualität von $\nu = 7$ eine Verdoppelung der Sperrbeanspruchung die Rückzündwahrscheinlichkeit auf den hundertfachen Wert bringt, wobei man bei statistischen Auswertungen stets das Gesetz der grossen Zahlen beachten muss, um starke Streuungen zu vermeiden.

Mit diesen Bemerkungen über die allen Gasentladungen eigentümlichen statistischen Schwankungserscheinungen soll dieser kurze Bericht über die Projektierungsgrundlagen von Quecksilberdampf-Stromrichtern abgeschlossen und zum letzten Thema, dem Ausblick auf die Zukunft, übergegangen werden.

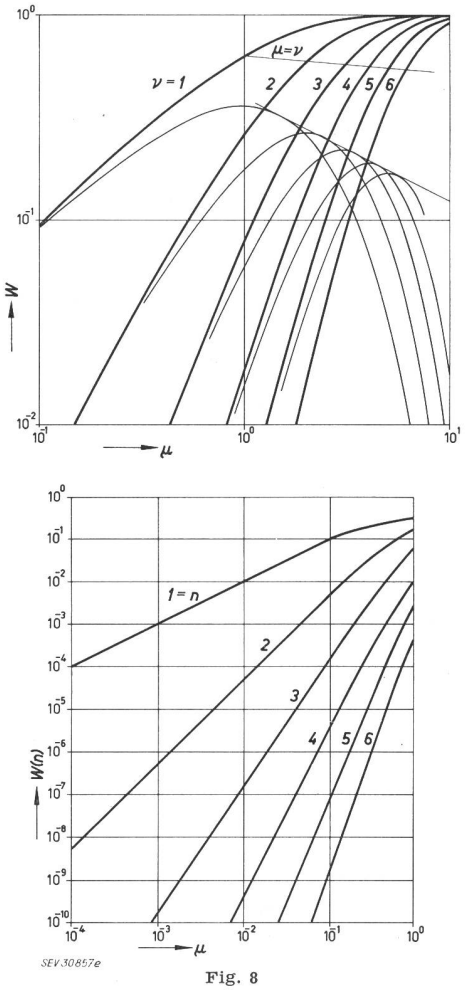

Fig. 8
Poissonsche Wahrscheinlichkeitsformel
oben Summenformel, *unten* einfache Formel
Bezeichnungen siehe im Text

3. Ausblick auf die zukünftige Anwendung der Stromrichter

Überall dort, wo die Steuerbarkeit von untergeordneter, der höchste Wirkungsgrad jedoch von entscheidender Bedeutung ist, wie bei Elektrolyseanlagen, hat zuerst der Kontaktumformer und dann der Halbleiter das Gasentladungsgefäss verdrängt. Es besteht jedoch kein Zweifel, dass der Quecksilberdampfgleichrichter damit keineswegs zur Bedeutungslosigkeit verurteilt ist, sondern in Zukunft sogar vermehrt überall dort eingesetzt werden wird, wo seine Steuereigenschaften voll zur Geltung kommen können.

Es handelt sich dabei, ohne erschöpfend zu sein, um die Anwendungen:

1. Als «Stellglied» im Regelkreis;
2. Als Gleich- und Wechselrichter für Höchstspannungs-Gleichstromübertragungen;
3. Als Schalter für die Höchstleistungs-Pulstechnik usw.

Bei allen diesen Anwendungen kann man mit vollem Recht sagen, dass die Zukunft schon begonnen hat.

3.1 Der Stromrichter im Regelkreis

Von 1930 ab ging man immer mehr dazu über, die von den Gleichrichtern abgegebene Spannung mittels der Gittersteuerung verlustlos zu verändern und auch Wechselrichter und Umrichter zu erproben. Als Gittersteuersätze wurden vorzugsweise Magnetverstärker verwendet, welche in Verbindung mit geeigneten Regelapparaturen selbst bei schwierigen Regelproblemen sehr zuverlässige und betriebssichere Lösungen ermöglichten. Solche Anordnungen werden heute und auch

---

[4]) Da *Kingdon* und *Lawton* [13] bereits 1933 die Poisson-Gleichung zur Beschreibung ihrer Messergebnisse über die Rückzündwahrscheinlichkeit verwendeten, so könnte der Eindruck entstehen, als ob sie damit auch schon die oben beschriebene Theorie zumindest teilweise vorweggenommen hätten. Dass dies jedoch nicht der Fall ist, geht wohl am überzeugendsten aus der Tatsache hervor, dass die Arbeit von *Kingdon* und *Lawton* keine nennenswerten Auswirkungen auf die praktische Stromrichtertechnik auszuüben vermochte. Der Fortschritt obiger Theorie gegenüber der Arbeit von *Kingdon* und *Lawton* besteht u. a. in folgendem:

Kingdon und *Lawton* haben an zwei verschiedenen Typen von Thyratrons einen starken Einfluss der Gefässkonstruktion auf das Eintreten von Rückzündungen festgestellt. Dieses Ergebnis musste als ein deutlicher Hinweis betrachtet werden, an einem bestimmten Gefässtyp gewonnene Messergebnisse nicht kritiklos auf andere zu übertragen bzw. diese nur innerhalb ihres Gültigkeitsbereiches (z. B. in einem bestimmten Temperaturbereich) anzuwenden. Ausserdem hatten *Kingdon* und *Lawton* ihre Prüfresultate mittels der Poissonschen Gleichung beschreiben können; es war jedoch unbekannt, ob und unter welchen Bedingungen man damit vom Modellzustand der Zeitrafferprüfung zum praktischen Betrieb über etwa 6 Dekaden der Rückzündwahrscheinlichkeit extrapolieren durfte. Der Autor erachtete es daher als eine entscheidende Aufgabe, zuerst die Rückzünd-Gesetzmässigkeit von Stromrichtergefässen mit Quecksilber-Kathode unter Original- und Modellbedingungen experimentell gründlich zu erforschen und dann durch langfristige Versuche den Nachweis zu erbringen, dass die Poissonsche Gleichung für die erwähnte Extrapolation in der Tat angewendet werden darf. Erst nachdem aus diesen Versuchen die geltenden Gesetzmässigkeiten und die Bedingungen für deren Reproduzierbarkeit erkannt worden waren, entschloss er sich 1955 zu deren Veröffentlichung. Neuere Messergebnisse von anderer Seite [14; 15], welche unter verschiedenen Modellbedingungen durchgeführt wurden, kamen übrigens teilweise zu anderen Resultaten als *Kingdon* und *Lawton*. Darin darf man eine Bestätigung obiger Ansicht erblicken, wonach der Einhaltung der Ähnlichkeitsbedingungen (zwischen Modell und Original) und den Versuchsbedingungen (Geometrie usw.) entscheidende Bedeutung zukommt.

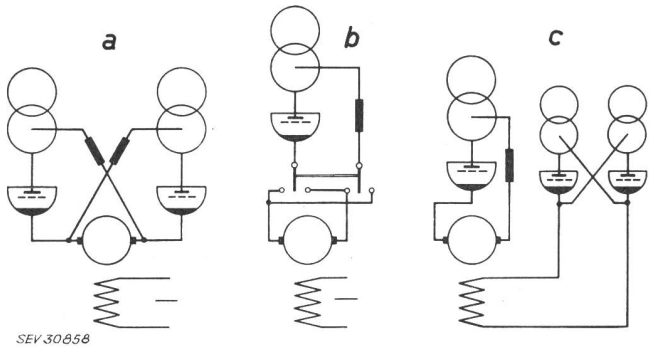

Fig. 9
Stromrichterschaltungen für Reversierantriebe
a Kreuzschaltung; *b* Eingefäßschaltung; *c* Feldumkehr

in Zukunft mit Erfolg überall dort angewendet werden, wo im Lastkreis merkliche Zeitkonstanten vorliegen. Dort wo man jede vermeidbare Trägkeit des Stromrichters beseitigen muss und der Stromrichter nur noch als ein mit der Totzeit von etwa 3,3 ms behaftetes «Stellglied» zu betrachten ist, pflegt man elektronische Steuerungen anzuwenden, die anfangs mit Röhren und heute vorzugsweise mit Transistoren aufgebaut werden. Diese etwa in den letzten 15 Jahren durchgeführte Entwicklung hat der europäischen Stromrichtertechnik eine führende Stellung in der Welt verschafft. Dieser erfreuliche Erfolg hat jedoch die Beteiligten nicht zu einem bequemen Ausruhen verleitet, sondern zu einer konsequenten Weiterführung der Entwicklung und damit schliesslich zur vollen Ausschöpfung der potentiellen Möglichkeiten geführt: zur digitalen Steuerung und Regelung. Eigentlich ist der Stromrichter wegen seiner diskontinuierlichen Schalterwirkung das digitale Gerät par excellence. Da jedoch ein digitales Schaltgerät schnellste Reaktion im Steuergerät verlangt, so war dieser Schritt erst jetzt möglich, wo eine geeignete Elektronik, mit gedruckten Schaltungen usw., zur Verfügung steht. Indessen ist sofort zu erwähnen, dass man die digitale Steuerung, die in der Regel teurer ist als analoge Steuerung, nur dort einsetzen wird, wo die Problemstellung, z. B. die Genauigkeit einer Regelung, es notwendig macht. Die digitale Steuerung besitzt als Kernstück die sog. «Logik»; darunter versteht man eine Anzahl von elektronischen Hilfsmitteln, meist als «Gatter» bezeichnet, welche logische Operationen durchführen können, d. h. mehrere Grössen, die verschiedene Zustände annehmen können, miteinander nach vorgegebenen Regeln zu einer neuen Grösse verknüpfen, die ebenfalls verschiedene Zustände besitzen kann. In der Regel werden nur zwei Zustände verwendet, ja—nein bzw. ein—aus, wobei dann von einer zweiwertigen oder binären Logik gesprochen wird.

Ein Beispiel möge die Leistungsfähigkeit dieses neuen Prinzips erläutern: Fig. 9 zeigt die bekanntesten Reversierschaltungen, etwa in der Reihenfolge ihrer zeitlichen Entwicklung. Bei einem solchen Umkehrantrieb muss man den Motor in beiden Drehrichtungen bei Gleichrichterbetrieb beschleunigen und bei Wechselrichterbetrieb abbremsen können. Diese Forderung wird in der Kreuzschaltung durch zwei Stromrichter technisch einwandfrei erfüllt. Wirtschaftlich gesehen erfordert sie jedoch den doppelten Gefässaufwand wie die 1941 erstmalig erprobte und seither in vielen Anlagen bewährte Eingefäss-Schaltung. Diese setzt jedoch, weil ein Stromrichter nur in einer Richtung Strom führen kann, einen Polwendeschalter voraus, der etwa 1 Million Schaltungen im Jahr ausführen und daher stromlos schalten muss. Obwohl die Anforderungen recht gut erfüllt werden konnten, hat man zwei weitere Schritte unternommen: man hat die Feldwendeschaltung entwickelt und ist ausserdem wieder zur Kreuzschaltung zurückgegangen, allerdings unter Anwendung von zwei Verbesserungen. Man hat 1. die bereits erwähnten Einanodengefässe gegenparallel an eine gemeinsame Sekundärwicklung des Transformators geschaltet (Fig. 10) und dadurch diesen erheblich verbilligt, und 2. mittels einer digitalen Steuerung den sog. Kreisstrom unterdrückt. Bei der Kreuzschaltung sind nämlich beide Gefässe dauernd in Betrieb und derart ausgesteuert (jeweils das eine als Gleichrichter und das andere als Wechselrichter und umgekehrt), dass wohl der arithmetische Mittelwert der Spannungen, aber nicht die Augenblickswerte übereinstimmen. Als Folge der momentanen Spannungsunterschiede fliesst ein Kreisstrom, dessen Grösse durch die in Fig. 10 sichtbaren Drosselspulen begrenzt wird. Dieser Kreisstrom kann nun durch die modernen Hilfsmittel der digitalen Steuerungen dadurch unterdrückt werden, dass man jeweils nur eine Gefässgruppe in Betrieb hält und die andere sperrt [16].

Obwohl diese Gedanken noch recht neu sind und ihre praktische Anwendung noch in den Anfängen steckt, lässt sich schon klar erkennen, dass damit Aufgaben gelöst werden können, die früher entweder unlösbar waren oder einen beträchtlichen Mehraufwand erforderten. So konnte z. B. für die wohl schwierigste schaltungstechnische Aufgabe der Stromrichtertechnik, den frequenzelastischen Umrichter, eine bemerkenswert elegante Lösung gefunden werden [17].

An dieser Stelle sei auch darauf hingewiesen, dass man heute den Quecksilberdampfstromrichter unbedenklich für Aufgaben einsetzt, wo höchste Betriebssicherheit gefordert werden muss. Daran lässt sich ermessen, welcher hohe Stand der Rückzündfreiheit erreicht wurde, nicht zuletzt dadurch, dass man die oben erwähnten physikalischen Erkenntnisse nutzbringend angewandt hat.

Modernste Steuerungen und Regelungen werden auch bei den Stromversorgungen für die Führungsmagnete der grossen Teilchenbeschleuniger, der Protonen-Synchrotrons, verwendet, um den extremen Genauigkeitsansprüchen genügen zu können.

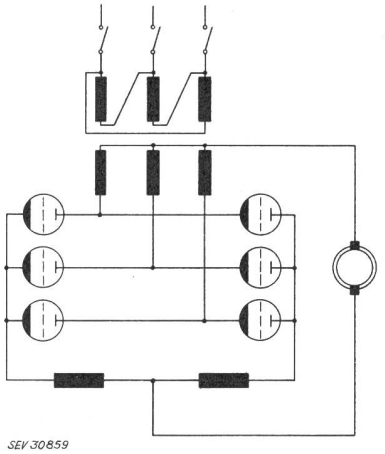

Fig. 10
Gegenparallelschaltung

Fig. 11
Pulsprogramm der Magnetspeisung der CERN in Genf
I Magnetstrom; *U* Spannung am Magneten; *P* Leistung; *n* Drehzahl des Umformersatzes

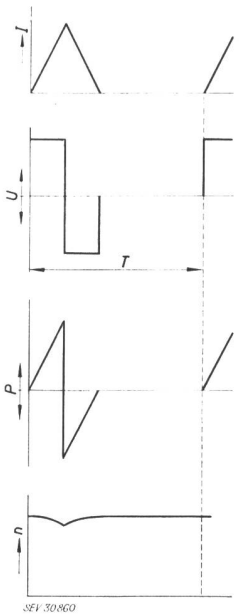

Fig. 11 zeigt das Pulsprogramm, den dreieckigen Stromverlauf und die rechteckige Spannung, welche Gleich- und Wechselrichterbetrieb erkennen lassen, da ja bei Stromanstieg Energie im Magneten gespeichert und bei Stromsenkung wieder abgegeben wird. Um das Netz nicht mit den hohen Leistungsspitzen zu belasten, pflegt man ein oder mehrere Schwungräder zu verwenden und den Energieaustausch im wesentlichen zwischen den rotierenden Massen und dem Magneten vorzunehmen. Bei Energieentnahme sinkt die Drehzahl um einige Prozente, um bei Rückarbeit wieder den normalen Wert anzunehmen. Fig. 12 zeigt die Prinzipschaltung der Magnetstromversorgung des 25-GeV-Protonen-Synchrotrons des Europäischen Kernforschungszentrums, CERN, in Genf [18]. Der Stromrichter besteht aus 24 wassergekühlten Einanodengefäs-

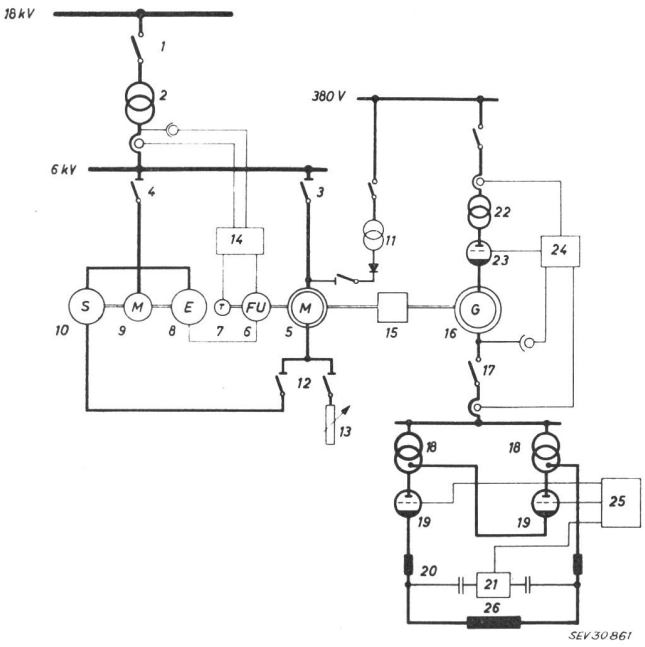

Fig. 12
Prinzip-Schaltbild der Magnetstromversorgung des Protonensynchrotrons der CERN in Genf
1 18-kV-Leistungsschalter; *2* Transformator 18/6 kV; *3* Hauptmotortrennschalter; *4* Leistungstrennschalter; *5* Hauptmotor; *6* Frequenzumformer; *7* Tachodynamo; *8* Scherbius-Erregermaschine; *9* Motor für *8* und *10*; *10* Scherbiusmaschine; *11* Bremsgleichrichter; *12* Rotortrenner; *13* Wasseranlasser; *14* Scherbiusregelung; *15* Schwungrad; *16* Hauptgenerator; *17* Generatorschalter; *18* Stromrichter-Transformatoren; *19* Hauptstromrichter; *20* Glättungseinrichtungen; *21* elektronischer Schalter für *20*; *22* Transformator für Erregung; *23* Erregerstromrichter; *24* Spannungsregelung; *25* elektronischer Zeitgeber; *26* Magnet

Partikel-Beschleuniger (Protonen-Synchrotrons) mit stromrichter-gespeisten Führungsmagneten

Tabelle I

Anlage	Ort	Energie GeV	Anzahl Ventile	Spitzenleistung pro 6 Ventile MW	Sperrspannung Scheitelwert kV	Ventilstrom Scheitelwert kA
CERN	Genf (Schweiz)	25	24	9,65	7,0	1,6
NIMROD	Harwell (England)	7	96	6,75	8,3	1,3

sen mit Vakuumpumpen. Tabelle I gibt die wichtigsten Daten der stromrichtergespeisten Führungsmagnete von Partikelbeschleunigern. Auch bei diesen Beschleunigern werden natürlich ausserordentliche Anforderungen an die Betriebssicherheit gestellt, die in der Anlage der CERN bisher gut erfüllt wurden. Für die Anlage «Nimrod» des Rutherford High Energy Laboratory of the National Institute for Research in Nuclear Science in Harwell, England, darf ein ähnlich günstiges Verhalten erwartet werden, da ihr die gleichen Prinzipien zugrunde liegen. Stromrichter-Erregung für Phasenschieber-Synchronmaschinen bietet übrigens die Möglichkeit, die Blindlast unmittelbar am Orte des Verbrauchers zu erzeugen [19] und Stromrichter auch an schwachen Netzen zu betreiben.

Eine weitere Anwendung, bei welcher ebenfalls sehr gute Steuereigenschaften und hohe Betriebssicherheit gefordert werden, stellt die Speisung von Gleichstromlichtbögen von etwa 7 kV für die Erzeugung von Acetylen dar. Solche Lichtbogenöfen, die von Prof. *P. Baumann* in den Chemischen Werken Hüls in den dreissiger Jahren entwickelt wurden [20] und seither in dauerndem Betrieb stehen, haben neuerdings auch für die Erdgasaufbereitung Interesse gefunden. In diesen Anlagen wird der Stromrichter als trägheitsloses Stellglied verwendet, um den Gleichstrom trotz der starken Schwankungen der Lichtbogenspannung konstant zu halten.

3.2 Energieübertragung mit hochgespanntem Gleichstrom

Ohne auf die alte Streitfrage Gleichstrom- oder Wechselstrom-Übertragung näher eintreten zu wollen, sollen lediglich einige Fragen der Schaltung und der Ventilbeanspruchung behandelt werden. Der Stand der Technik und die historische Entwicklung wird aus Tabelle II deutlich. Um übersichtlich zu bleiben, sind einige Versuchs-Übertragungen (Mechanicsville-Schenectady, Wettingen-Zürich, ...) weggelassen worden. Die beiden ersten Übertragungen (Berlin und Bodio) waren reine Versuchsanlagen und nur kurzzeitig in Betrieb. Die nächsten drei Übertragungen (Moskau, Gotland und Ärmelkanal) sind gegenwärtig in Betrieb und die letzte der Übertragungen gerade erst in Montage. Die aus der Tabelle II ersichtliche Zunahme der Übertragsleistung zeigt recht deutlich, wie man dabei vom Gross-Versuch zum praktischen Einsatz in der Energiewirtschaft fortschreitet. Die 1961 in Betrieb genommene Kanal-Übertragung wurde parallel zu einer Drehstrom-Übertragung errichtet und soll einen Energieaustausch zwischen dem französischen und dem englischen Landesnetz ermöglichen. In Russland sind noch riesige Wasserkräfte ungenützt. In den meisten Fällen werden die Standorte von Kraftwerken und Verbrauchern nicht benachbart sein, weshalb dort gegenwärtig eine rund 500 km lange Gleichstrom-Übertragung von den 2000-

Technische Daten der Quecksilberdampf-Stromrichterventile von Gleichstrom-Höchstspannungs-Übertragungen

Tabelle II

Jahr	Strecke	Gleichspannung kV	Gleichstrom kA	Leistung MW	Anzahl Anoden total	Ventil-Sperrspannung Scheitelwert kV	Ventilstrom Scheitelwert kA	Leistung pro 6 Ventile MW
1943	Berlin–(Siemensstadt-Moabit)	100	0,03	3	6	100	0,03	3
1944	Bodio	31	0,4	12,4	6	100	0,133	12,4
1950	Kaschira–Moskau	200	0,15	30	18 (3 Anoden in Serie)	70	0,15	10
1954	Schweden–Insel Gotland	100	0,2	20	24 (2 Anoden parallel)	50	0,1	5
1961	Boulogne–Lydd-Kanal	200	0,8	160	48 (4 Anoden parallel)	50	0,2	20
In Montage	Stalingrad–Donbass	800	0,9	750	96 (2 Anoden in Serie)	100	0,9	45

MW-Wasserkraftwerken von Stalingrad nach dem Donbecken errichtet wird [22].

Um die Tabellenwerte richtig deuten zu können, sei erwähnt, dass die ASEA mehrere parallel arbeitende Anoden pro Gefäss verwendet, während in den russischen Stationen mehrere Ventile in Serie geschaltet sind, von denen jedes jedoch für die im Störungsfalle auftretende erhöhte Sperrspannung bemessen ist. Unter dieser Voraussetzung gilt dann das von verschiedenen Forschern [20;21] entdeckte Produktgesetz der RZ-Wahrscheinlichkeiten:

$$W = \pi W_n$$

(Andernfalls ist natürlich mit einer erhöhten Rückzündwahrscheinlichkeit zu rechnen [12]). Ohne eine abschliessende Bewertung vornehmen zu wollen, scheint daher die Serienschaltung von Ventilen den Vorzug zu verdienen; diese sich physikalisch anbietende Tendenz ermöglicht offenbar (gemäss Tabelle II) auch eine merklich höhere Leistung pro 6 Anoden umzuformen, als dies bei Parallelschaltung möglich scheint.

War bisher die Entwicklung der Höchstspannungs-Ventile ausschliesslich empirisch vorgenommen worden, so ist neuerdings auch hier eine rechnerische Behandlung der Belastbarkeit möglich [11]. Das wesentliche Ergebnis kann in dem lapidaren Satz zusammengefasst werden, dass das Sperrvermögen von Höchstspannungsanoden von der gleichen Grössenordnung ist wie bei Niederspannungsanoden, dass jedoch wegen des langsameren Einschwingens und der Vermeidung des Überschwingens der Sperrspannung durch Dämpfungsmittel eine Leistungsteigerung um etwa den Faktor 3 möglich ist. Ein Ergebnis, das ebenfalls aus der Tabelle II hervorgeht, wenn man die Serie-Schaltungen ausser Betracht lässt. Besonders deutlich geht dieses Resultat auch aus Fig. 13 hervor, in welcher die Scheitelwerte von Ventilstrom und -Spannung dargestellt sind. Diese Figur zeigt, dass:

1. Schon die ersten Anlagen bereits Sperrspannungen von 100 kV beherrschten und von Brown Boveri in

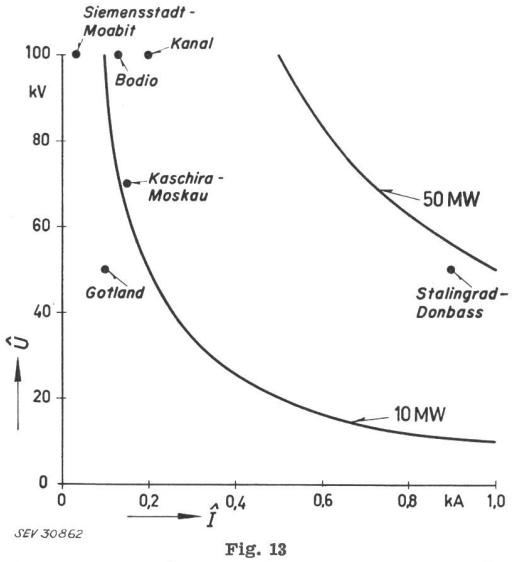

Fig. 13

Anodendaten verschiedener Höchstspannungs-Stromrichter

$\hat{U}$ Anodenspannung, Scheitelwert; $\hat{I}$ Anodenstrom-Scheitelwert

Bodio schon 1942 eine Leistung pro Anode umgeformt wurde, die erst 1950 in der Moskauer Versuchsanlage mit 3 Gefässen in Serie erreicht wurde;

2. Man bei den Parallelschaltungen neuerdings zu höheren Sperrspannungen geht, während man bei den Serienschaltungen die Sperrspannung eher erniedrigt.

Der Wechselstrom ermöglicht einen einfacheren Aufbau, er ist dagegen betrieblich komplizierter. Der Gleichstrom benötigt ausser Transformatoren auch Stromrichterstationen, bietet dafür aber einfachere Verhältnisse auf der Übertragungsleitung. Für künftige Beschlüsse in Bezug auf die Systemwahl wird es von entscheidender Bedeutung sein, ob die derzeit an mehreren Orten durchgeführten Entwicklungsarbeiten zur Schaffung eines Gleichstrom-Höchstspannungs-Leistungsschalters zu einem erfolgreichen Abschluss gebracht werden können.

3.3 Stromrichterventile als Schalter

Im folgenden soll die Verwendung von Quecksilberdampf-Ventilen als Hochleistungsschalter in der modernen Plasmaforschung betrachtet werden. Fig. 14 zeigt die prinzipielle Anordnung, um die in der Kapazität C gespeicherte elektrische Energie in die magnetische Energie der Induktivität L zu überführen: Die Gefässe haben verschiedene Funktion und Beanspruchung. Gefäss V muss zuerst bei hoher positiver Kondensatorspannung infolge negativem Gitter gesperrt sein, dann einen sinusförmig ansteigenden Strom führen und im Spannungs-Nulldurchgang wieder sicher sperren. Das Gefäss S wird dagegen spannungsmässig kaum beansprucht, es muss jedoch in einer möglichst momentanen Kommutierung mit einem $di/dt \approx 10^{1}$ A/s den sehr grossen Strom von $10^5 ... 10^6$ A übernehmen, der fortan exponentiell abfallend durch die Belastung $L + R$ und S kreist. Wo ein Gefäss nicht ausreicht, werden natürlich mehrere parallel geschaltet — es ist jedoch sehr wichtig, dass die Induktivität dieser Kreise so klein als möglich, etwa 10^{-8} H, gemacht wird. *D. B. Cummings* [25] hat über die Entwicklung derartiger Ventile berichtet, deren Zündung zu höchster Präzision (Schwankungen kleiner als $2 \cdot 10^{-8}$/s) gesteigert werden konnte. Vorläufig wird jedoch die Lebensdauer solcher Gefässe durch die Metallverdampfung begrenzt, welche

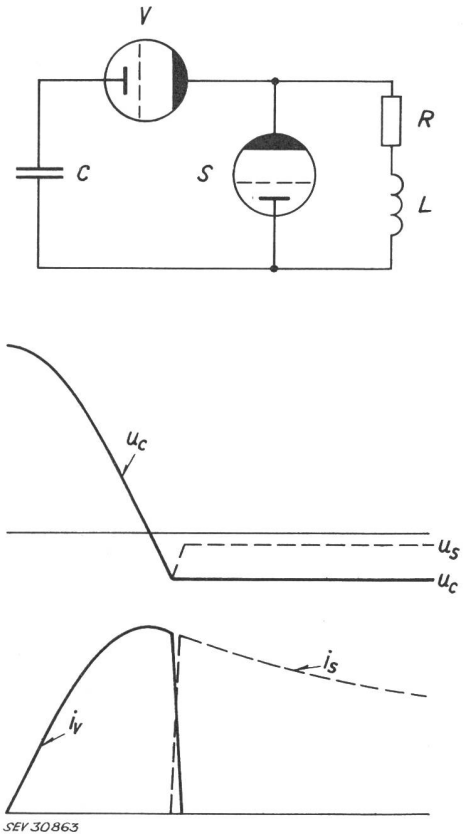

Fig. 14
Quecksilberdampf-Ventile als Hochleistungsschalter der Plasmaforschung
V, S Stromrichtergefässe; *C* Speicher-Kondensator; *R* Verlustwiderstand; *L* Induktivität; u_c Kondensatorspannung; u_s Spannung an Ventil *S*; i_v, i_s Strom in Ventil *V* bzw. *S*

die an der Wandung entstehenden Kathodenflecken hervorrufen. Hier werden dem Gefässkonstrukteur neue, sehr interessante Aufgaben gestellt, die zwar weitere intensive Forschungen erfordern, der zukünftigen Anwendung jedoch ebenfalls neue Möglichkeiten eröffnen werden.

Damit kann abschliessend festgestellt werden, dass sich der Quecksilberdampf-Stromrichter, dem vor kurzem im Halbleiter-Gleichrichter ein beachtlicher Konkurrent entstanden ist, gegenwärtig in einer so stürmischen Weiterentwicklung befindet, dass als Folge dieses Wettbewerbs ein erfreulicher Fortschritt für die gesamte Elektrotechnik zu erwarten ist.

4. Zusammenfassung

Es wird gezeigt, dass gegenwärtig auf dem Gebiete der Quecksilberdampfstromrichter einige recht bemerkenswerte Fortschritte zu verzeichnen sind, die gerade rechtzeitig gekommen sind, um dem Quecksilberdampf-Stromrichter die gebührende Stellung bei der industriellen Automation zu sichern.

Diese Fortschritte sind:

1. Konstruktiv und fabrikatorisch konnten bedeutende Leistungs- und Qualitätssteigerungen erzielt werden, die besonders deutlich bei den neuen Einanodengefässen für hohe Stossbelastbarkeit zum Ausdruck kommen.

2. Physikalisch konnten die Ventileigenschaften durch Messung und Rechnung soweit erfasst werden, dass eine zuverlässige Anlagenprojektierung ermöglicht wird.

3. Schaltungstechnisch ermöglichte die moderne Elektronik neuartige schaltungstechnische Lösungen und eröffnet den Weg zu höchster Regelungs-Präzision.

Diese Fortschritte erlauben die Prognose, dass die zukünftige Anwendung der Quecksilberdampf-Stromrichter dank der ständigen Weiterentwicklung, insbesondere auf den erwähnten und zum Teil völlig neuartigen Gebieten, optimistisch beurteilt werden kann.

Literatur

[1] *Schäfer, B.:* Über Quecksilberdampf-Gleichrichter für grosse Leistungen. Diss. TH Darmstadt, 1912.

[2] *Schiesser, M.:* 25 Jahre Brown Boveri Mutator. Brown Boveri Mitt. 25(1938)5/6, S. 83...93.

[3] *Egloff, P.:* Die erste 50 000-Volt-Gleichstrom-Energieübertragung mit Mutatoren. Brown Boveri Mitt. 26(1939)4/5, S. 92...96.

[4] *Ehrensperger, Ch.:* Einige Gegenüberstellungen der Energieübertragung mit Drehstrom oder Gleichstrom und die technisch reife Lösung der Gleichstromübertragung. Brown Boveri Mitt. 32(1945)9, S. 284...295.

[5] *Schönhuber, M. J.:* Fortschrittliche Fertigungstechnik im Quecksilberdampf-Stromrichterbau. Brown Boveri Mitt. 48(1961)10, S. 572...586.

[6] *Roth, K.:* Betriebseigenschaften der neuen Brown Boveri Einanodenmutatoren. Brown Boveri Mitt. 48(1961)11/12, S. 638...644.

[7] *Wasserrab, Th.:* Die Belastbarkeit der Mutatoren. Brown Boveri Mitt. 42(1955)4/5, S. 133...143.

[8] *Wasserrab, Th.:* Die Belastbarkeit der Mutatoren bei zeitlich veränderlicher Last. Brown Boveri Mitt. 43(1956)11, S. 467...475.

[9] *Wasserrab, Th.:* Die Überlastbarkeit der Mutatoren. Brown Boveri Mitt. 44(1957)3, S. 134...141.

[10] *Bertele, H. von* und *Th. Wasserrab:* Umschaltschwingungen in Stromrichteranlagen. E und M 60(1942)31/32, S. 332...338.

[11] *Wasserrab, Th.:* Zur Theorie der Kommutierungsrückzündungen von Mutatoren. Brown Boveri Mitt. 47(1960)12, S. 883...894.

[12] *Wasserrab, Th.:* Die Zündspannung von Quecksilberdampf-Entladungsgefässen. Z. angew. Phys. 13(1961)4, S. 194...201.

[13] *Kington, K. H.* und *E. J. Lawton:* The Relation of Residual Ionization to Arc-back in Thyratrons. Gen. Electr. Rev. 42(1939)11, S. 474...478.

[14] *Peche, E.:* Messungen über die Rückzündungswahrscheinlichkeit von Quecksilberdampf-Stromrichtern. Diss. Techn. Univ. Berlin, 1961.

[15] *Zipfel, V.:* Die Rückzündungswahrscheinlichkeit von Niederspannungs-Quecksilberdampf-Stromrichtergefässen in Abhängigkeit von elektrischen Beanspruchungsgrössen. Arch. Elektrotechn. 46(1961)4, S. 245...258.

[16] *Meyer, M.:* Neuere Erkenntnisse über den Stromrichter in Gegenparallelschaltung. VDE-Fachber. 21(1960), S. I/63...I/66. (Diskussionsbemerkungen von *M. Depenbrock* S. I/67.)

[17] *Kanngiesser, K.-W.:* Ein neuer frequenzelastischer Umrichter. VDE-Fachber. 21(1960), S. I/82...I/86.

[18] *Ludwig, E. H., P. Rauhut, Th. Wasserrab* und *R. Zwicky:* Die Stromversorgung für das Protonen-Synchrotron des CERN, Genf. Brown Boveri Mitt. 46(1959)6, S. 327...349.

[19] *Frey, W.* und *R. Noser:* Evolution récente de la question de l'excitation et du réglage des machines synchrones. Conférence Internationale des Grands Réseaux Electriques (CIGRE), 17. Session 1958, Bd. 2, Rapp. 127.

[20] *Keller, H.:* Neue Resultate machen die Gleichstrom-Hochspannungs-Übertragung mit Mutatoren reif für den Bau einer ersten Anlage. Brown Boveri Mitt. 32(1945)9, S. 310...318.

[21] *Slepian J.* und *W. E. Pakala:* Arc-Backs in Ignitrons in Series. Trans. AIEE 60(1941), Juni, S. 292...294.

[22] *Butaev, F. I., E. S. Groiss, E. K. Levitski u. a.:* Design Features of the Stalingrad-Donbass 800 kV D. C. Line. Direct Curr. 4(1958)2, S. 59...66.

[23] *Forst, H.-J.:* Elektrowärme in Hütten- und Walzwerken. BBC-Nachr. 43(1961)3, S. 172...182.

[24] *Müller-Lübeck, K.:* Die Steuerkennlinien eines Stromrichters mit antiparallel geschalteten Ventilen bei Wechselstrombetrieb. Arch. Elektrotechn. 46(1961)1, S. 41...46.

[25] *Cummings, D. B.* Development of Switching Tubes for Controlled Fusion Research. Electr. Engng. 79(1960)11, S. 918...922.

Adresse des Autors:
Prof. Dr. *Th. Wasserrab*, AG Brown, Boveri & Cie., Baden (AG).