Die Entwicklung der Leistungsstromrichter

Autor(en): **Kloss, A.**

Objekttyp: **Article**

Zeitschrift: **Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association Suisse des Electriciens, de l'Association des Entreprises électriques suisses**

Band (Jahr): **73 (1982)**

Heft 15

PDF erstellt am: **23.05.2024**

Persistenter Link: https://doi.org/10.5169/seals-904988

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.
Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.
Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Ein Dienst der *ETH-Bibliothek*
ETH Zürich, Rämistrasse 101, 8092 Zürich, Schweiz, www.library.ethz.ch

http://www.e-periodica.ch

BULLETIN des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins
de l'Association Suisse des Electriciens
des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätswerke
de l'Union des Centrales Suisses d'Electricité

Elektrotechnik und Elektronik
Electrotechnique et électronique

Die Entwicklung der Leistungsstromrichter

A. Kloss

621.314.57;

Nach einigen Hinweisen auf die Bedeutung und Hauptmerkmale der Leistungsstromrichter zeichnet der Autor ein Bild der weltweiten Entwicklung von den ersten Patenten über die Technik der Quecksilberdampf-Gleichrichter bis zur modernen Thyristortechnik.

Après quelques indications sur l'importance et les caractéristiques principales des convertisseurs de courant, l'auteur en décrit l'évolution internationale, depuis les premiers brevets et la technique des redresseurs à vapeur de mercure jusqu'aux thyristors modernes.

Vor 100 Jahren sind durch die Entdeckung der Ventilwirkung des Quecksilberdampf-Lichtbogens die physikalischen Grundlagen der Leistungsstromrichter geschaffen worden. 20 Jahre später erfolgte die Patentierung, und nach weiteren 10 Jahren begann die Industrieproduktion von Grossstromrichtern. Fünfundzwanzig Jahre sind es her, dass das steuerbare Leistungshalbleiterventil, der Thyristor, entdeckt wurde. Die Bedeutung des Thyristors für die elektrische Energietechnik kann der Bedeutung des Transistors für die Nachrichtentechnik gleichgesetzt werden.

1. Die Bedeutung der Umformung und Steuerung der elektrischen Energie mittels Stromrichtern

Die elektrische Energie wird vorwiegend in Kraftwerken als periodische sinusförmige Wechselspannung konstanter Amplitude und Frequenz erzeugt. Auf dem drahtgebundenen Übertragungsweg zu den Verbrauchern wird die Spannung in der Regel mehrmals transformiert, das heisst, es wird die Spannungsamplitude auf einen höheren oder niedrigeren Wert verändert. Damit können einerseits die Übertragungsverluste minimal gehalten, anderseits das Spannungsniveau dem Anwendungszweck angepasst werden.

Für eine ganze Reihe von Anwendungen in der Industrie und im Transportwesen ist es allerdings aus technisch-wirtschaftlichen Gründen zweckmässig, nicht nur die Amplitude, sondern auch die Frequenz der Spannung zu verändern, und zwar nicht nur auf einen konstanten, sondern auf einen gewünschten prozessbedingten Wert. Man kann diese Vorgänge allgemein als *Umformung* und Steuerung der elektrischen Energie bezeichnen.

Diese Umformung kann grundsätzlich entweder elektromechanisch – (durch rotierende elektrische Maschinengruppen) oder statisch – (durch *Stromrichter*) realisiert werden. Durch verschiedene Vorteile, wie höheren Wirkungsgrad, kleineren Raumbedarf, höhere Betriebssicherheit und bessere Steuermöglichkeiten haben die modernen Stromrichter die rotierenden Maschinenumformer nach und nach fast vollständig in allen Industriebereichen verdrängt. Darüber hinaus wurden besonders nach der Erfindung der *Leistungshalbleiter* vor 25 Jahren auf dem Gebiet der Stromrichtertechnik in der Energie- und Antriebstechnik ganz neue Wege eingeschlagen.

Der Anteil der durch die Stromrichter umgeformten elektrischen Energie nimmt stetig zu. In den Industriestaaten wird schätzungsweise 25 bis 50% der gesamten elektrischen Leistung durch Stromrichteranlagen übertragen. Alle Bahnsysteme, die mit Industriespannung (50 Hz) oder Gleichspannung (600 bis 3000 V) elektrifiziert sind, übertragen die volle Leistung über Stromrichter. Das gilt auch für alle Arten der Stadtbahnen, wie Strassenbahn, Trolleybus oder U-Bahn, und für grössere Seil- und Bergbahnen. Bei den 16⅔-Hz-Eisenbahnnetzen der Schweiz, von Deutschland, Österreich und Schweden nimmt die Anwendung der Stromrichter in den letzten Jahren ebenfalls zu.

Hohen Bedarf an Stromrichterleistung weist die Elektrochemie auf. Bei der Erzeugung des Aluminiums werden zum Beispiel riesige Stromrichteranlagen benötigt. Aber auch zur Verarbeitung der Metalle, besonders wieder des Aluminiums und des Stahls, werden in den Walzwerken leistungsstarke Stromrichterantriebe gebraucht.

In der Energietechnik finden die Stromrichter zur Erregung der Generatoren, als Blindleistungskompensatoren und für die Hochspannungs-Gleichstromübertragung Anwendung. So ist zum Beispiel das englische Netzsystem mit dem kontinentalen oder das osteuropäische Netz mit denjenigen von Westeuropa über Stromrichteranlagen verbunden. Selbst bei den unkonventionellen Energiequellen, sei es Windkraft, Sonnenenergie oder thermonukleare Fusion, kommt man ohne Stromrichter nicht aus. In den Versorgungskreisen der Radiosender, der unterbrechungsfreien Stromversorgungen für Krankenhäuser, Satellitenstationen oder Computeranlagen – dort überall findet man Stromrichter.

Jedes moderne Automobil und Fernsehgerät beinhaltet einen Stromrichter. Obwohl die Leistung pro Einheit relativ klein ist, entspricht die gesamte installierte Stromrichterleistung in einem Land wie der Schweiz mit je zwei Millionen Einheiten zehn grossen Aluminiumwerken.

Noch vor 25 Jahren waren die Erkenntnisse der Stromrichtertechnik einem engen Kreis von Spezialisten vorbehalten. Heute kommt kein Elektroingenieur ohne die Grundkenntnisse der Stromrichtertechnik, oder moderner gesagt: der *Leistungselektronik*, aus.

2. Hauptmerkmale der Leistungsstromrichter

Die Leistungsstromrichter gehören zusammen mit den rotierenden elektrischen Maschinen, Transformatoren und Apparaten zu den Grundeinrichtungen der elektrischen Energietechnik. Im Gegensatz zu den anderen Einrichtungen sind aber die Stromrichter *modular* aufgebaut. Die Leistung der Stromrichter wird nicht, wie zum Beispiel bei den Maschinen, durch Vergrösserung der geometrischen Abmessungen, sondern vorwiegend durch Reihen- und Nebeneinanderschaltung von Bauelementen gesteigert.

Die Stromrichterbauelemente, die *Stromrichterventile*, werden heute als gesteuerte Thyristoren oder als ungesteuerte Dioden auf Halbleiterbasis hergestellt. Das Ausgangsmaterial ist monokristallisches Silizium. In einen Stromrichter werden je nach dessen Anwendung von ein paar Stück bis zu Tausenden von Thyristoren oder Dioden eingebaut.

Das System der *Bauelemente* der Stromrichterkonstruktion erlaubt erstens eine wirtschaftliche serienmässige Herstellung der Elemente, zweitens die volle Schaltungsfreiheit bei der Auslegung der Stromrichteranlagen und drittens eine einfache Behebung von Störungen im Betrieb der Anlagen. Im Gegensatz zu elektrischen Grossmaschinen, bei denen die einzelnen Ersatzteile mehrere Tonnen wiegen, liegt das Gewicht der grossen Stromrichterventile etwa bei 1 kg.

Neben den Stromrichterventilen als Grundlage der Stromrichter sind die Steuerung und Regelung, die Schutzeinrichtungen und die Kühlung für die Funktion der Stromrichter ebenfalls von grosser Bedeutung.

Die Stromrichterventile wirken wie *kontaktlose Schalter*. Der Ein- und Ausschaltprozess spielt sich bei den modernen Ventilen im Festkörper, im Halbleiter, ab. Er kann aber auch anders, zum Beispiel im Plasma, realisiert werden. Durch die Steuerung der Einschaltmomente wird der Strom, der allerdings nur in einer Richtung fliessen kann, gesteuert. Die Leistung der Steuersignale ist gegenüber der gesteuerten Stromrichterleistung sehr gering. Der Stromrichter wirkt somit wie ein Verstärker.

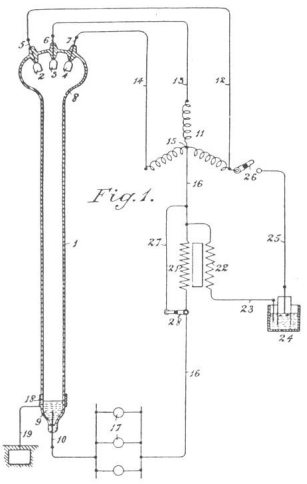

Fig. 1 Der erste Quecksilberdampf-Gleichrichter, gemäss der Patentschrift von P. Hewitt aus dem Jahre 1902

3. Hauptströmungen in der Entwicklungsgeschichte der Stromrichtertechnik

Die Entwicklung der Stromrichtertechnik kann von zwei verschiedenen Gesichtspunkten aus verfolgt werden: aus der Sicht der *Anwendung*, wobei es sich vorwiegend um die Schaltung, Steuerung und Regelung der Stromrichter handelt, oder aus der Sicht der *Bauelemente*, wo das physikalische Prinzip der Ventilwirkung, die Technologie und die Konstruktion der Stromrichterventile von Interesse sind.

Die erste Stromrichterschaltung wurde vor 85 Jahren von *Graetz* veröffentlicht [1][1]). Diese Schaltung wird noch heute unverändert angewendet, obwohl inzwischen eine ganze Reihe von verschiedenen Stromrichterschaltungen entwickelt worden sind. Das erste Stromrichterventil, 5 Jahre später von *Hewitt*[2]) entdeckt [2], wäre dagegen heute allenfalls ein Museumsstück, da es in keiner Weise den neuartigen Ventilen ähnelt (Fig. 1).

3.1 Stromrichter Bauelemente

Die erste Generation der Stromrichterventile waren Ionenelemente. Die Stromübertragung spielte sich im Plasma (Lichtbogen) des Quecksilberdampfes ab. Die Ladungsträger waren Ionen, wobei die Ionisation des Dampfes durch emittierte Elektronen von der flüssigen Quecksilberkathode angeregt wurde. Der Raum wurde luftleer gehalten. Diese Stromrichter wurden Quecksilberdampf-Gleichrichter genannt.

[1]) Die Grundlage der Schaltung bildet die Messbrücke, die *Wheatstone* 1843 beschrieben hat, die aber *S. H. Christie* schon 1833 veröffentlicht hatte.

[2]) *P. C. Hewitt* patentierte 1902 in Deutschland unter No. 157 642 «Gleichrichter für Wechselstrom» den mehrphasigen Quecksilberdampf-Gleichrichter im Glasgefäss. Die Erfindung basiert auf der mehrjährigen Entwicklung der Quecksilberdampflampe. Schon 1882 hat *Jamin* die Ventilwirkung des Lichtbogens erkannt. 1892 berichtete *L. Arons* über Versuche mit Quecksilberlichtbogen bei Strömen über 10 A. (Wiedenmeier Ann. 47, S. 767). Die erste Beschreibung des Quecksilberdampf-Gleichrichters erschien in ETZ, 1904, H. 51. S. 1105.

Bei der Herstellung ging es um die Vakuumtechnologie, mit Stahl, Glas, Graphit und Quecksilber als Grundstoffe. Die Entwicklung wurde, wegen der Komplexität der Plasmaphysik, fast nur empirisch betrieben. Die konstruktive Ausführung der Quecksilberdampf-Gleichrichter war deshalb auch von Hersteller zu Hersteller stark verschieden.

Die Ära der Ionenventile dauerte etwa 60 Jahre und wurde schliesslich durch diejenige der *Halbleiterventile* abgelöst. Die gesteuerten Halbleiterleistungselemente, die Thyristoren, wurden 1957 entdeckt [3]. Die Halbleitertechnologie, aufgebaut auf dem monokristallinen Silizium und durch gute theoretische Kenntnisse der Festkörperphysik untermauert, ermöglichte eine stetige Verbesserung der Ventilparameter, die heute noch immer nicht abgeschlossen ist. Trotz der Vielzahl von Konstruktionen bei den Ionenventilen ist die konstruktive Ausführung der Halbleiterventile bei den einzelnen Herstellern weitgehend gleich.

Die Produktion der Quecksilberdampfventile wurde nur bei den grössten Firmen der Maschinenindustrie und nur in den technisch hochentwickelten Ländern im Zeitraum zwischen 1910 und 1930 eingeführt. Diese Firmen haben dann am Ende der fünfziger Jahre auch den Übergang von der Vakuumtechnologie zu der ganz andersartigen Halbleitertechnologie bewältigt und die Produktion der Leistungshalbleiter aufgenommen.

Die Entwicklung der Stromrichterbauelemente für die Energietechnik verlief praktisch parallel und analog zur Entwicklung der aktiven Bauelemente für die Nachrichtentechnik. Den Elektronenröhren, Dioden und Trioden der Nachrichtentechnik entsprachen die Ionenröhren, das heisst ungesteuerte und gesteuerte Quecksilberdampfventile der Stromrichtertechnik. Alle wurden mittels der gleichen Vakuumtechnologie hergestellt. Den späteren Halbleiterdioden und Transistoren, die die Elektronenröhren ersetzt haben, entsprechen nun die Leistungsdioden und -thyristoren, ebenso auf der gleichen technologischen Basis hergestellt.

Aus der Elektronik einerseits und der Ionik anderseits wurde also eine gemeinsame Halbleitertechnik. Allerdings wird heute die Halbleitertechnik für die Nachrichtentechnik weiterhin als Elektronik bezeichnet, diejenige für die Energietechnik, das heisst die Stromrichtertechnik, jedoch *Leistungselektronik* genannt [4].

3.2 Anwendung der Stromrichter

Die Stromrichter wurden zuerst als konstante Gleichspannungsquellen, als ungesteuerte Gleichrichter, eingesetzt. Anwendungsgebiete waren hauptsächlich die Bahnen und Elektrolysen (Fig. 2), wo die Stromrichter die rotierenden Umformer ersetzten. Nach der Erfindung der Gittersteuerung [5] wurden schon in den dreissiger Jahren alle wichtigen Schaltungen der Gleichrichter, Wechselrichter und Umrichter ausgearbeitet [6].

Damit waren zwar die Grundlagen für die geregelten Stromrichterantriebe gelegt [7], aber die wirklich breite Anwendung dieser Technik kam erst in den sechziger Jahren. Inzwischen wurden die Quecksilberdampf-Gleichrichter vorwiegend in den Unterstationen der Gleichstrombahnen, in gewissen Lokomotiven der Wechselstrombahnen [8] und in den Gleichstromanlagen der Elektrochemie verwendet.

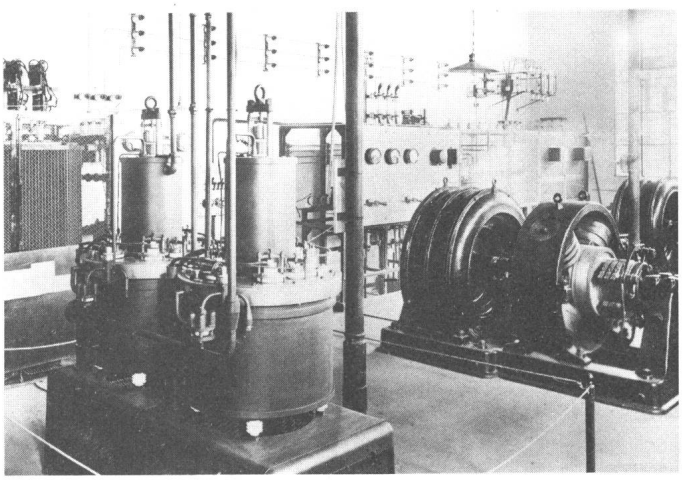

Fig. 2 Quecksilberdampf-Gleichrichter für die Strassenbahn in Zürich aus dem Jahre 1915, Nennleistung 160 kW

Nach der Entwicklung der Transistortechnik [9] in den fünfziger Jahren konnten, dank der zuverlässigen und schnellen Steuer- und Regelelektronik, die Stromrichter als Leistungsstellglieder in Regelkreisen der elektrischen Antriebe eingesetzt werden. Die bis dahin verwendeten rotierenden Maschinensätze wurden durch die wirtschaftlich vorteilhaften Stromrichter allmählich ersetzt. Als am Ende der sechziger Jahre die Thyristoren die gesteuerten Quecksilberdampfventile ersetzt hatten, verbreitete sich die Stromrichtertechnik, jetzt schon Leistungselektronik genannt, in praktisch allen Bereichen der elektrischen Antriebs- und Energietechnik. Jahrzehnte alte Ideen, Schaltungen und Anwendungen wurden in kürzester Zeit und im höchsten Leistungsniveau realisiert.

4. Randgebiete der Stromrichterentwicklung

Die Quecksilberdampf-Stromrichter im Stahlgefäss [10] waren während der ersten Periode der allgemeinen Industrieanwendung, vom Ersten Weltkrieg bis in die Mitte der sechziger Jahre, Hauptträger der Stromrichtertechnik (Fig. 3). In kleinerem Rahmen wurden aber noch Quecksilber-

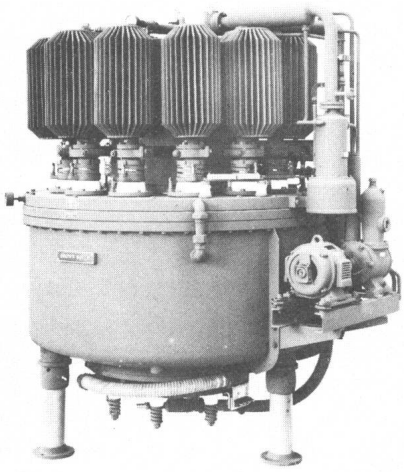

Fig. 3 Mehranodiger Quecksilberdampf-Gleichrichter aus den dreissiger Jahren

dampf-Gleichrichter im Glasgefäss, Quecksilberdampfventile mit Glühkathode (Thyratron) und Hochdruck-Lichtbogenstromrichter gefertigt. Neben diesen Ionenventilen kamen auch mechanische Kontaktgleichrichter [11], rotierende Hochspannungs-Gleichrichter und im unteren Spannungsbereich polykristalline Selengleichrichter zur Anwendung.

Die Kontakt-Gleichrichter wurden zum Beispiel nur in der Schweiz und in Deutschland serienmässig hergestellt. Die Produktion lief während der fünfziger Jahre voll, wurde aber nach der Einführung der Halbleitergleichrichter am Anfang der sechziger Jahre eingestellt. In anderen Ländern, wie in der Tschechoslowakei, kam die Entwicklung der Kontaktgleichrichter zu spät. Die ersten Einheiten wurden hier gleichzeitig mit den ersten Halbleitergleichrichtern im Betrieb eingesetzt, konnten mit diesen aber nicht konkurrieren, so dass die industrielle Produktion der Kontaktgleichrichter überhaupt nicht begonnen wurde.

Die ersten Leistungshalbleiter auf Germaniumbasis wurden in den fünfziger Jahren gebaut [12; 13] (Fig. 4). Die Germaniumdioden sind aber bald durch Siliziumdioden ersetzt und die Thyristoren von Anfang an nur als Siliziumelemente gebaut worden. Als eine Entwicklungszwischenstufe kann man auch die durch Transduktoren gesteuerten Selen- und Siliziumgleichrichter betrachten [14]. Seit Ende der sechziger Jahre beherrschen die Thyristoren die Stromrichtertechnik vollständig.

5. Übersicht über die weltweite Stromrichter-Entwicklungsgeschichte

Diejenigen Länder, die die Stromrichtertechnik vor 50 bis 70 Jahren einführten, sind bis heute auf diesem Gebiet führend geblieben. Die Erfindung der Thyristoren, die einfach zu transportieren, lagern und montieren sind, ermöglichte zwar auch andern Ländern in den letzten zwei Jahrzehnten mit importierten Bauelementen eine eigene Stromrichterherstellung aufzubauen. Diese sind aber für die technische Entwicklung eher weniger massgebend.

Entwicklungen in den USA

Sowohl der erste Quecksilberdampf-Stromrichter (1902), als auch die ersten Leistungshalbleiter (Diode 1953, Thyristor 1957) wurden in den Vereinigten Staaten entwickelt. Auch die Gittersteuerung (1914), das Thyratron (1926) und das Ignitron (1933), Ionenventile mit Glühkathode respektive spezieller Zündung, sind amerikanischer Herkunft. Trotz dieser Pionierleistungen können aber die USA in der Stromrichtertechnik nicht als führend bezeichnet werden. Der Verzicht auf die Eisenbahnelektrifizierung und die Vernachlässigung des Stadt-Massenverkehrs und der Energie-Fernübertragung hemmte die für diese Bereiche notwendige Entwicklung der Hochleistungs-Stromrichtertechnik.

Die in den letzten Jahren in Nordamerika erstellten riesigen Stromrichteranlagen für die Energieübertragung und Blindleistungskompensation wurden daher von westeuropäischen Firmen geliefert. Im niedrigen Leistungsbereich, mit grossem Anteil der Signal- und Mikroelektronik, stehen jedoch die USA an der Spitze der Entwicklung.

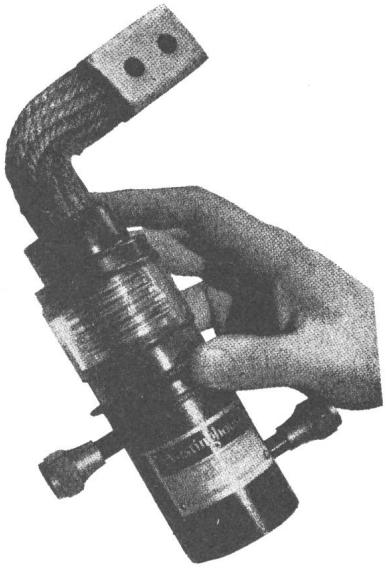

Fig. 4 Die erste Leistungsdiode aus Germanium, aus dem Jahre 1954
Nennstrom 200 A, Nennspannung 80 V, wassergekühlt, Bezeichnung: Semitron

Wichtige Arbeiten in Westeuropa

Bereits vor dem ersten Weltkrieg bauten Firmen in Deutschland und in der Schweiz Quecksilberdampf-Gleichrichter. In der Zwischenkriegszeit folgten Frankreich, Grossbritanien, Österreich, Belgien und Schweden. Die Produktion wurde nur in den grössten Maschinenfabriken (BBC, AEG, Siemens, ASEA, ACEC, Elin usw.) aufgenommen. Voraussetzung dafür war die Beherrschung der Vakuumtechnologie und der Plasmaphysik.

Die grundlegenden Arbeiten in der Schaltungstechnik der Stromrichter wurden im deutschsprachigen Raum in der Zwischenkriegszeit geleistet [14; 15]. Das betrifft besonders die Umrichtertechnik und die Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung (HGUe). Die betriebsreife HGUe-Versuchsanlage Elbe-Berlin, an der noch während der letzten Kriegsmonate gearbeitet wurde [16; 17; 18], konnte allerdings erst fünf Jahre später zwischen Kaschira und Moskau in Betrieb genommen werden.

Bis zum Ende der sechziger Jahre war Schweden das einzige Land im Westen, das die HGUe-Technik gepflegt und dabei auch erstaunliche Leistungen erzielt hat [19]. So wurde Grossbritannien schon 1961 mittels schwedischer HGUe-Anlagen über Unterseekabel mit Frankreich energetisch verbunden. Erst in den siebziger Jahren holten schweizerische und deutsche Unternehmen diesen schwedischen Vorsprung ein, wobei die Periode der Quecksilberdampfventile übersprungen und gleich die erste grosse Anlage (Cabora Bassa in Moçambique) mit Thyristoren ausgeführt wurde [20].

Obwohl die ersten Wechselstromlokomotiven mit Gleichrichtern noch vor dem zweiten Weltkrieg in Deutschland gebaut wurden, haben die französischen Staatsbahnen diese Technik bereits in den frühen fünfziger Jahren durchgesetzt. Die französischen Ignotron-Lokomotiven (mit Ignitrons amerikanischer Bauart) [21] wurden auch Vorbild für die Sowjetunion, die Tausende von diesen Schienenfahrzeugen baute. Auch in Grossbritannien wurden auf diesem

Gebiet grosse technische Leistungen vollbracht. Im Jahre 1956 nahm dort das erste Schienenfahrzeug mit Halbleiterelementen (Germaniumdioden) den Betrieb auf [22]

Weltpremiere in der Schweiz

Als erste Firma der Welt hat BBC Brown Boveri, Baden, vor siebzig Jahren (1912) die Industrieproduktion der Quecksilberdampf-Grossgleichrichter aufgenommen [23]. Zwei Jahre später wurde im Kantonsspital in Zürich die erste Stromrichteranlage in Betrieb genommen. Nach dem kriegsbedingten Unterbruch kam es aber erst in der Mitte der zwanziger Jahre zur serienmässigen Herstellung von Stromrichter-Grossanlagen, deren Produktion sich stetig steigerte. Da die schweizerischen Hauptbahnen mit Wechselstrom 16⅔ Hz, bei dem man keine Stromrichter brauchte, elektrifiziert wurden, musste sich der Hersteller von Anfang an auf den Export ausrichten. Schon im Jahre 1924 wurde daher ein 4000-V-Gleichrichter für die italienischen Gleichstrombahnen geliefert.

Anderseits gehört die Schweiz aber zu den ersten und grössten Produzenten von Aluminium, wo für die Elektrolyse Gleichstrom benötigt wird, so dass auf diesem Anwendungsgebiet rege inländische Nachfrage herrschte (Fig. 5). Der erste Gleichrichter für Elektrolyse wurde 1927 geliefert [24].

Im Jahre 1927 hat die Maschinenfabrik Oerlikon ebenfalls mit der Produktion der Quecksilberdampf-Gleichrichter angefangen [25] und zehn Jahre später wurde die Stromrichtertechnik bei Sécheron in Genf eingeführt. Hier entstanden die ersten pumpenlosen Quecksilberdampf-Gleichrichter der Welt. Die Entwicklung der pumpenlosen Gefässe wurde in der ersten Hälfte der dreissiger Jahre in Zürich von *W. Dällenbach* und *E. Gerecke* mit Erfolg abgeschlossen [26].

Eine weitere erstaunliche Leistung der schweizerischen Stromrichtertechnik der Zwischenkriegszeit war die Gleichstromübertragung (50 kV) Wettingen–Zürich, die versuchsweise schon im Jahre 1939 in Betrieb stand [27]. Erst 30 Jahre später aber wurden auf diesem Gebiet die Arbeiten wieder aufgenommen, allerdings dann schon auf Thyristorbasis. Seit Mitte der siebziger Jahre beherrscht man neben der HGUe-Technik (Fig. 6) auch die Technik der Hochspannungs-Thyristorkompensatoren [28]. Fast die Hälfte der weltweit installierten Kompensationsleistung kommt aus der Schweiz, während die andere Hälfte aus Schweden geliefert wurde.

Auch Japan mit Stromrichtertechnik

Neben Europa und den USA gehört nur noch Japan zu den Ländern mit eigener Stromrichtertechnik. 1950 realisierte man dort noch mit den Quecksilberdampfventilen eine Versuchsanlage der Hochspannungs-Gleichstromübertragung mit 50 kV [29]. 1965 wurden dann mittels dieser Technik die beiden japanischen Netzsysteme, 50 Hz und 60 Hz, verbunden. Für die Gleichstrombahnen (1500 V) wurde 1960 schon ein Silizium-Gleichrichter in Betrieb gesetzt. Auch die weltbekannten Tokaido-Expresszüge, die seit 1964 in Betrieb stehen, sind mit Leistungshalbleitern ausgerüstet.

Fig. 5 Einanodige Quecksilberdampf-Gleichrichter-Gruppe aus den fünfziger Jahren, Nennleistung 3 MW

Seit einigen Jahren steht Japan mit seinen Thyristoren an der Weltspitze. Dies betrifft insbesondere die abschaltbaren Thyristoren, die praktisch nur in diesem Land hergestellt werden.

Osteuropa zog später nach

Von den osteuropäischen Ländern haben in der Zwischenkriegszeit nur die Sowjetunion (1926) und die Tschechoslowakei (1929) die Produktion der Quecksilberdampf-Stromrichter aufgenommen.

Die Stromrichtertechnik wurde in *Prag* mit der französischen Technologie eingeführt. Die Produktion blieb bis zum Ende des Zweiten Weltkrieges bescheiden. Nach dem

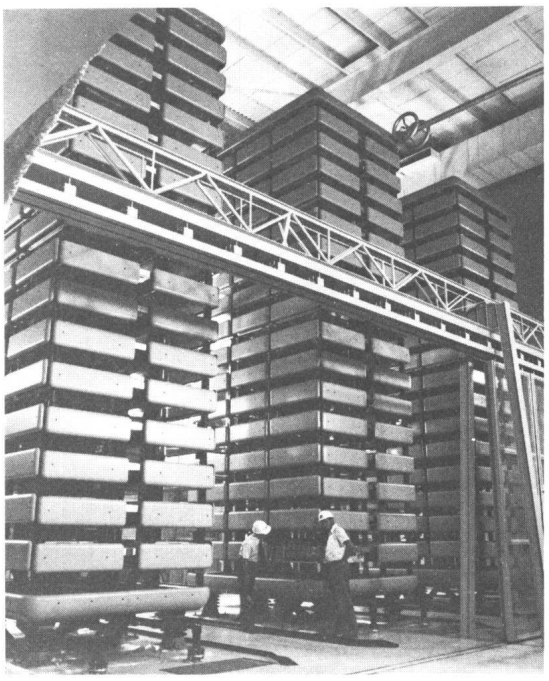

Fig. 6 Thyristor-Stromrichter für Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung 2000 MW aus den siebziger Jahren

Krieg wurden dann im Zusammenhang mit der Elektrifizierung der Eisenbahnen mit 3000 V Gleichstrom und mit dem Ausbau der Aluminiumindustrie einanodige Quecksilberdampfventile eigener Konstruktion hergestellt. In der zweiten Hälfte der fünfziger Jahre beherrschte man die Technologie der Ignitrons.

Germanium-Leistungsdioden wurden schon 1956 entwickelt, und fünf Jahre später erfolgte die Erprobung der ersten Silizium-Gleichrichterlokomotiven [30]. Der Produktion der Leistungshalbleiter opferte man die bekannte Motorradfabrik «Jawa» und baute sie auf eine Kapazität um, die derjenigen der grössten Halbleiterfabriken der Welt entspricht. In den sechziger Jahren lieferte die tschechoslowakische Industrie mehrere hundert Gleichrichter-Lokomotiven, vorwiegend an die UdSSR. Thyristoren stellt das Land seit 1966 her.

In der Sowjetunion begann die Produktion der Quecksilberdampf-Gleichrichter in Leningrad, wurde aber im Krieg nach Swerdlovsk verlegt. Nach dem Krieg wurden weitere Produktionsstätten in der Ukraine (Saporoschje) und in Estland (Tallin) aufgebaut. Die Entwicklung der Stromrichter erfolgte in Forschungsinstituten in Moskau und Leningrad, wo auch sehr grosse Stückzahlen von Stromrichtern hergestellt wurden. Dort begann in der Mitte der fünfziger Jahre auch die Pilotproduktion der Leistungsdioden.

Ein grosser Teil der Stromrichterproduktion in der UdSSR ist für elektrische Bahnen bestimmt. Neben dem Gleichstromsystem 3000 V erstellte man seit Mitte der fünfziger Jahre auch das Wechselstromsystem 50 Hz/25 kV. Dafür wurden in den sechziger Jahren jährlich mehrere hundert Ignitron-Lokomotiven geliefert.

Mit grosser Intensität ist in der UdSSR auch die HGUe-Technik gefördert worden. Im Jahre 1951 wurde bei Moskau die erste 200-kV-Versuchsanlage der Welt (auf der Basis der deutschen Elba-Berlin-Einrichtung) in Betrieb genommen [31]. In den sechziger Jahren wurde, noch mit den Quecksilberdampfventilen, eine Hochspannungs-Gleichstromübertragung auf dem Spannungsniveau von 800 kV mit einer Länge von knapp 500 km realisiert [32]. In den siebziger Jahren installierte die Sowjetunion jährlich etwa 10 000 MW Stromrichterleistung.

6. Entwicklungstendenzen der Stromrichtertechnik

Der allgemeine Trend, die mechanische und elektromechanische Energieumformung und -steuerung durch Leistungselektronik zu ersetzen, hält ununterbrochen an, verstärkt in letzter Zeit durch die allgemeinen Energieprobleme. In der Entwicklungskurve der Stromrichtertechnik sind, sowohl was die Anwendungsbereiche als auch die Bauelemente betrifft, noch keine Sättigungserscheinungen bemerkbar.

Allerdings ist eine weitere Steigerung des leistungselektronisch umgeformten Anteils in der Leistungsbilanz der elektrischen Energielieferung nicht ganz problemlos. Die elekrische, schnelle Umformung und Steuerung der Leistung ist zwar energiesparend, führt aber allgemein zur Verzerrung der Netzspannung. Da auf viele elektrische Verbraucher eine stark deformierte Speisespannung störend wirkt, darf die Netzspannungsverzerrung, das heisst die Abweichung vom idealen Sinusverlauf, ein gewisses Niveau nicht überschreiten [33]. Damit sind also die Grenzen für die Zunahme der installierten Stromrichterleistung im Netz gegeben. Durch schaltungstechnischen Mehraufwand kann zwar die Stromrichter-Netzrückwirkung eliminiert werden, damit steigen aber neben dem Beschaffungspreis auch die Verluste. Man kann also erwarten, dass in Zukunft der Optimierung dieses Problemes viel Aufmerksamkeit geschenkt wird.

Literatur

[1] *Elektrochemisches Verfahren, um Wechselströme in Gleichströme zu verwandeln. ETZ 18(1897)29, S. 423...424.*

[2] *P. C. Hewitt:* Gleichrichter für Wechselstrom. Deutsches Reichspatent No. 157 642, 1902.

[3] *C. W. Mueller* and *J. Hilibrand:* The «thyristor»–a new high-speed switching transistor. IRE Trans. Electron Devices 5(1958)1, p. 2...5.

[4] *A. Kloss:* Zum Begriff und der Geschichte der Leistungselektronik. Elektroniker 19(1980)5, S. EL 15...EL 16.

[5] *I. Langmuir:* Electrical discharge controlling device and method of operating the same. US Patent No. 1 289 823, 1914.

[6] *M. Schenkel:* Technische Grundlagen und Anwendungen gesteuerter Gleichrichter und Umrichter. ETZ 53(1932)32, S. 761...786.

[7] *E. F. W. Alexanderson, M. A. Edwards* and *C. H. Willis:* Electronic speed control of motors. Trans. AIEE 57(1938)6, p. 343...354.

[8] *H. von Bertele:* Rectifier locomotives. Direct Current 2(1955)6, p. 143...155.

[9] *J. Bardeen* and *W. H. Brattain:* The transistor–a semiconductor triode. Physical Review, second series 74(1948)2, p. 230...231.

[10] *B. B. Schäfer:* Ein neuer Quecksilberdampf-Gleichrichter für grosse Leistungen. ETZ 32(1911)1, S. 2...5.

[11] *C. Ehrensperger:* The contact converter. Direct Current 1(1952)3, p. 63...67.

[12] *J. L. Boyer:* Power rectification via germanium and silicon. Westinghouse Engineer 14(1954)5, p. 183...186.

[13] *G. L. Pearson* and *W. H. Brattain:* History of semiconducteur research. Proc. IRE 43(1955)12, p. 1794...1806.

[14] *L. F. Borg* and *P. G. Engström:* Application of the transductor in rectifier technique. Direct Current 2(1954)3, p. 58...65.

[15] *W. Dällenbach* und *E. Gerecke:* Die Strom- und Spannungsverhältnisse der Grossgleichrichter, Arch. Elektrotechn. 14(1924)2, S. 171...246.

[16] *K. Müller-Lübeck* und *E. Uhlmann:* Die Strom- und Spannungsverhältnisse der gittergesteuerten Gleichrichter. Arch. Elektrotechn. 27(1933)5, S. 347...373.

[17] *T. Wasserrab:* Die Drehstrombrückenschaltung für Stromrichter. E und M 59(1941)1/2, S. 3...9.

[18] *A. Menge:* Die Energieversorgung des mitteleuropäischen Raumes durch hochgespannten Gleichstrom. ETZ 69(1948)2, S. 37...44 + Nr. 3, S. 83...89.

[19] *P. Danfors* und *H. Mårtensson:* Entwicklung der HGÜ-Technik bei der ASEA. ASEA-Zeitschrift 24(1979)3, S. 51...55.

[20] *H. Pesch:* Die Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung Cabora Basa-Apollo: Systemverhalten und Betriebserfahrungen. ETZ 100(1979)26, S. 1493...1501.

[21] *M. Y. Machefert-Tassin:* La traction électrique à courant alternatif monophasé à fréquence industrielle et le matériel moteur à redresseurs. Revue SW (Schneider-Westinghouse) -(1958)27, p. 3...97.

[22] *J. A. Broughall* ans *J. C. Read:* Operating experience with a semiconductor rectifier multiple-unit train. The Beama Journal -(1956)11, p. 151...156.

[23] *B. Schäfer:* Der Quecksilberdampf-Umformer, BBC-Mitteilungen 2(1915)10, S. 127...132.

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

[25] *M. Wellauer:* Gleichrichter-Anlagen der Maschinenfabrik Oerlikon. Bull. Oerlikon -(1929)96, S. 435...440.

[26] *E. Gerecke:* Pumpenlose Quecksilberdampf-Gleichrichter Bauart Sécheron. Sécheron Mitteilungen, -(1940)12, S. 8...10

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

[28] *H. J. Bossi* und *J. Käuferle:* Leistungselektronik verbessert die Qualität der elektrischen Energieverteilung. Brown Boveri Mitt 67(1980)1, S. 50...54.

[29] *N. Yameda* a. o.: H.V.D.C. thyristor convertor development in Japan. Direct Current new series 1(1970)4, p. 139...153.

[30] *J. Becka* and *A. Kloss:* Czechoslovak semiconductor rectifics of a. c. electric locomotives. Direc Current, new series 1(1970)3, p. 93...98.

[31] *A. M. Nekrasov* and *V. P. Pimenov:* Development work in the USSR on d. c. transmission. Direct Current 2(1955)8, p. 199...207.

[32] *N. Chuprakov* a. o.: Initial period of operation of the d. c. transmission line between Volgograd and Donbass. Direct Current 11(1966)4, p. 142...145 + 148.

[33] *G. Goldberg:* Zulässiger Pegel der Oberschwingungsspannungen in Niederspannungs- und Mittelspannungsnetzen. Bull. SEV/VSE 73(1982)1, S. 2...8.
G. Goldberg et *H. Sauvain:* Niveau admissible des tension harmoniques dans les réseaux basse et moyenne tension. Bull. ASE/UCS 73(1982)5, p. 197...202.

Adresse des Autors

Albert *Kloss*, Elektroingenieur, BBC Brown Boveri & Cie AG, Abt. IES, 5401 Baden.