

Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association suisse des électriciens, de l'Association des entreprises électriques suisses

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen

Band: 77 (1986)

Heft: 19

Artikel: Geschichte der europäischen Leistungselektronik

Autor: Kloss, A.

DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-904281>

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: 26.01.2026

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

Geschichte der europäischen Leistungselektronik

A. Kloss

Die Geschichte der Leistungselektronik ist so alt wie die Geschichte der Elektrotechnik und Elektrophysik. Der Aufsatz vermittelt eine Fülle von historischen Informationen von den ersten vakuum-elektrischen Experimenten bis zu den Leistungshalbleitern, gegliedert in drei Entwicklungsphasen: die vorindustrielle Entwicklung, die Leistungs-Ionik und die Leistungs-Halbleiterelektronik.

L'histoire de l'électronique de puissance est aussi vieille que celle de l'électrotechnique et de l'électrophysique. L'exposé donne de nombreuses informations qui vont des premières expérimentations de l'électricité dans le vide jusqu'au semi-conducteurs de puissance, selon trois phases de développement: le développement pré-industriel, l'électronique de puissance ionique et l'électronique de puissance à semi-conducteurs.

Die vorindustrielle Entwicklung

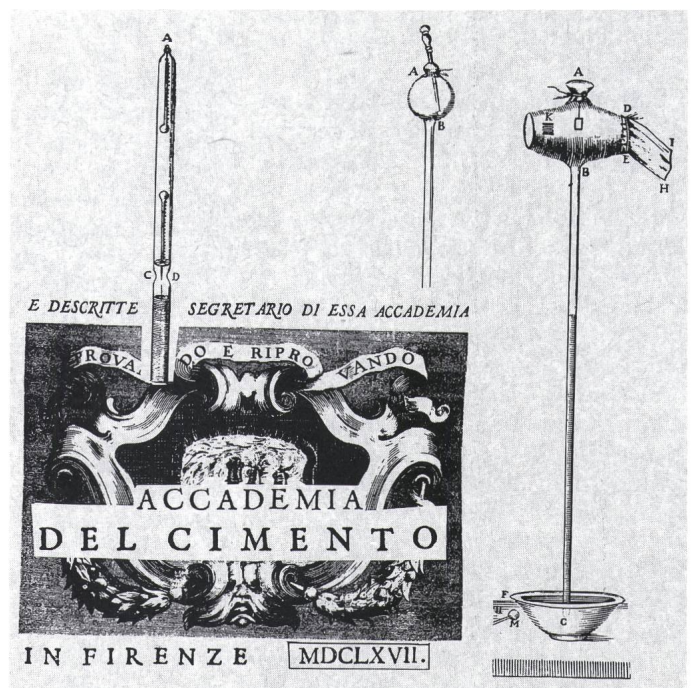
Physikalische Grundversuche

Im Jahre 1675 beobachtete der Pariser Akademiker *J. Picard*, dass eine Bewegung des Quecksilbers im Glasrohr des Barometers zum Leuchten des luftleeren Raumes führt. Diese rätselhafte Erscheinung erweckte bei den Naturwissenschaftlern grosses Interesse. Wie aus der Schrift des Schweizer Gelehrten *Joh. Bernoulli* [1, 2] «Sur le phosphore du baromètre», 1701, ersichtlich ist, wurde das Leuchten zuerst dem Phosphor zugeschrieben. Im Jahre 1704 begann *F. Hauksbee* in London vor der «Royal Society» mit seinen «physical-mechanischen» Experimenten [3]. Die erste Demonstration, «Several Experiments on Mercurial Phosphorus», wurde unter Vorsitz von Newton veranstaltet. Seine Untersuchungen führten bald zum Resultat,

dass die Lichterscheinungen im luftarmen Raum durch Elektrizität verursacht wurden. Nach *F. Hauksbee* setzten *S. Gray* [1], 1720 in London, und *C. Du Fay*, 1733 in Paris, die vakuum-elektrischen Experimente fort. In den vierziger Jahren experimentierte in Leipzig *J. H. Winkler* mit Glimmentladungen. In England war es *J. T. Desagulier* und in Frankreich *Abbé J. A. Nollet*, die in der Mitte des Jahrhunderts mit luftleerem Raum und Reibungselektrizität Versuche machten. In den siebziger Jahren stellte in Italien *G. B. Beccaria* aus leuchtenden Glasröhrchen sogar Buchstaben her. Im Jahre 1785 versuchte *G. C. Morgan* zu beweisen, dass das Hochvakuum den elektrischen Strom nicht leiten kann. Dass aber im Vakuum das elektrische Feld wirkt, was übrigens schon die Mitglieder der «Accademia del Cimento» in Florenz um das Jahr 1660 erkannt hatten (Fig. 1), wurde dabei nicht bezweifelt [4].

Fig. 1
Vakuum-elektrische Experimente

In den sechziger Jahren des 17. Jahrhunderts wurden in Florenz von den Mitgliedern der «Accademia del Cimento» zahlreiche vakuum-elektrische Experimente durchgeführt.



Adresse des Autors

Albert Kloss, Ahornstrasse 1, 5442 Fislisbach.

Ventilwirkung

Dass das heiße Gas, die Flamme, die Elektrizität überträgt, wurde auch schon in der florentinischen Akademie festgestellt. Ein Jahrhundert später, 1774, beschrieb *W. Henly* in «Philosophical Transactions» unter dem Titel «On the Direction of the electric matter» [5], wie man die Flamme als Indikator der elektrischen Polarität (Fig. 2) verwenden kann und schlug vor, auch das Vakuumrohr zu diesem Zweck anzuwenden.

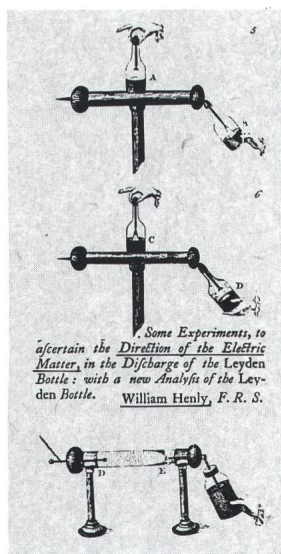


Fig. 2 Methode zur Feststellung der Stromrichtung in Vakuumröhren
Erfindung von W. Henly im Jahre 1774.

Die Erfindung der Voltaschen Batterie, 1800, ermöglichte erstmals Experimente mit Dauerstrom. Schon im Jahre 1802 kam der Berliner Professor *P. Erman* mit der Entdeckung der «Unipolaren Leiter». Er definierte dabei die Flamme als einen «positiv-unipolaren» Leiter, der den «negativen Effekt isoliert und nur den positiven leitet». Die Seife zählte er zu den «negativ-unipolaren» Leitern. Die Unipolarität stellte Erman auch zwischen Platin- und Quecksilberelektrode im Vakuum fest. Er war der erste, der den Effekt der Gleichrichtung des elektrischen Stromes exakt beschrieb.

Im Jahre 1830 wandte sich *G.S. Ohm* [1] dem Problem der «unipolaren Leiter» zu und stellte fest, dass die Unipolarität nicht durch den Leiter selbst, sondern durch den Übergang zwischen den Leitern verursacht wird. Dabei entdeckte Ohm auch schon den Gleichrichtungseffekt beim Kupferoxid.

1783 führte *A. Volta* [1] für die Stoffe, die zwischen den sehr guten und

sehr schlechten Leitern liegen, den Begriff «Halbleiter» ein [6]. Knapp ein Jahrhundert später, 1877, schrieb *C.F. Braun* [1] «Über Abweichungen vom Ohmschen Gesetz in metallisch leitenden Körpern» [7].

In Belfast entdeckte 1838 *T. Andrews*, dass ein glühender Platindraht in einer Gasflamme unterschiedlich, je nach Polarität, entweder den Strom durch das erhitzte Gas leitet oder isoliert. Er setzte dann seinen Flammengleichrichter anstelle des mechanisch rotierenden Kommutators bei der Saxtonischen elektromagnetischen Maschine ein und ist damit der erste, der je ein Stromrichterventil auf Basis des ionisierten Gases angewendet hat.

In «Comptes rendus hebdomadaires des séances de l'Académie des sciences» erschien im Jahre 1855 von *J.M. Gauguin* eine Notiz «Sur un appareil électrique qui fait fonction de soupape» [8], in welcher er schrieb: «Ich habe mir vorgenommen, einen Apparat zu finden, welcher die Eigenschaft besäße, wie ein Ventil die Ströme von einer Richtung aufzufangen und die von der anderen frei durchzulassen.» Er benutzte dazu das zu jener Zeit für verschiedene vakuum-elektrische Zwecke gebräuchliche, luftleere «elektrische Ei».

Lichtbogen-Gleichrichtung

In den ersten Jahren des neunzehnten Jahrhunderts kam es zur Entdeckung des elektrischen Lichtbogens. Praktisch gleichzeitig wurde in Jena der hell leuchtende und stetig brennende Funke von Kohle und Metall in der Luft von *J.W. Ritter* [1], in London von *H. Davy* [1] und in St. Petersburg von *W. Petrow* beobachtet. *L. Foucault* [1] erkannte vier Jahre später, dass der Lichtbogen je nach Polarität unterschiedlich brennt. *J.T. Way* führte Versuche mit Quecksilber-Lichtbögen in der Luft durch und konstruierte mit Hilfe eines Quecksilberstrahles eine Lichtbogenlampe. Dass der Quecksilberdampf-Lichtbogen im luftleeren Raum als Gleichrichter wirkt und dass

man ihn anstelle eines mechanischen Kommutators verwenden könnte, beschrieben *J.P. Jamin* und *G. Maneuvrier* 1882 erstmals in den Abhandlungen der Pariser Akademie. *J. Sahulka* entwickelte diese Idee 1894 in Wien weiter und stellte die erste Versuchsvariante eines Quecksilberdampf-Gleichrichter her.

Mechanische Gleich- und Wechselrichter

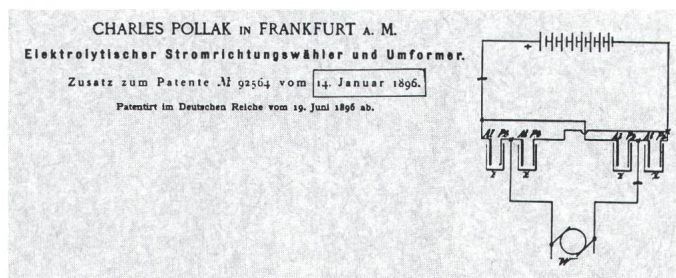
Im Jahre 1832, wurden die ersten rotierenden magneto-elektrischen Maschinen gebaut. Gleich am Anfang der Entwicklung stehen auch mechanische, rotierende Gleichrichter bzw. Wechselrichter. Der Mechaniker *A.H. Pixii* in Paris und Professor *W. Ritchie* in London waren die ersten, die diesen benützten. *M.H. Jacobi* [1] in St. Petersburg führte für diesen rotierenden Umrichter den Ausdruck Kommutator ein. Er verwendete den rotierenden, handbetriebenen Kommutator bei physikalischen Versuchen im Jahre 1835 auch als Wechselrichter und erreichte dabei Frequenzen bis zu 1 kHz. Drei Jahre später konstruierte in Berlin *Ch. Poggendorf* [1] einen Stromunterbrecher, den er als «Inversor» bezeichnete.

Zur praktischen Anwendung der rotierenden Gleichrichter kam es zum ersten Mal in den neunziger Jahren. *Ch. Pollak* aus Frankfurt setzte 1895 in Zürich zwei Gruppen rotierender Gleichrichter von je 30 kW Leistung in Betrieb.

Gleichrichter-Schaltungen

Von *Ch. Pollak* stammt auch das erste Schema der einphasigen Gleichrichter-Brückenschaltung (Fig. 3). Am 1. Mai 1897 publizierte dann Professor *L. Graetz* in München «Ein elektrochemisches Verfahren zur Umwandlung von Wechselströmen in Gleichströme» [10], wo er die gleiche Schaltung beschrieb. Das Prinzip der Brückenschaltung geht übrigens auf Faradays [1] Kollege *S.H. Christie* zurück,

Fig. 3
Erste Abbildung einer Gleichrichter-Brücke
Patent von Ch. Pollak, dem Inhaber der Akkumulatorenfabrik, aus dem Jahre 1896 [9].



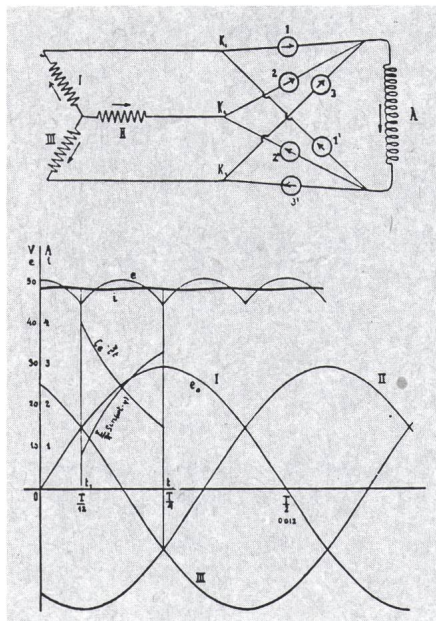


Fig. 4 Erste dreiphasige Gleichrichterbrücke von L. Kallir, 1898.

der sie 1833 als erster zu Messzwecken benutzte. Von Ch. Wheatstone [1] wurde die Messbrücke dann zehn Jahre später in London wiederentdeckt. Die heute üblichen Bezeichnungen Wheatstone-Brücke und Graetz-Schaltung ehren also nicht die tatsächlichen Erfinder.

Die einphasige Brückenschaltung als Gleichrichter wurde am 22. Juli 1897 in der «Elektrotechnischen Zeitschrift» zum ersten Mal veröffentlicht [10]. Am 25. Dezember 1898 erschien dann in der Wiener «Zeitschrift für Elektrotechnik» von L. Kallir [11] die erste Beschreibung der Schaltung einer dreiphasigen Brücke (Fig. 4).

Die erste mathematische Analyse des gleichgerichteten Wechselstromes wurde im Jahre 1891 von J. Puluj in Prag durchgeführt. Puluj wandte bei der Untersuchung des zweipulsigen Gleichstromes die Fourieranalyse an.

Kathodenstrahlen

Die verbesserte Vakuumpumpe und Glasrohrfertigung von H. Geissler [1] (1885) bildeten die notwendige Voraussetzung für die intensive Erforschung der elektrischen Gasentladung, die in der zweiten Hälfte des neunzehnten Jahrhunderts betrieben wurde. Am Anfang standen Experimente von J. Plücker [1] mit Glimmentladung aus den Jahren 1858–1862. Sein Schüler J. W. Hittorf [1] führte die Versuche weiter. E. Goldstein taufte 1876 die rätselhaften elektrischen Strömungen im Gas auf «Kathodenstrahlen», und

W. Crookes bezeichnete 1880 das ionisierte Gas als den «vierten Zustand» der Materie.

C. G. Kessler glaubte schon im Jahre 1747, in Breslau, dass es «Moleküle der Electricität» [12] gibt und W. Weber nahm 1871 in Leipzig an, dass «an jedem ponderablen Atom ein elektrisches Atom haftet». Zwanzig Jahre später, 1891, benutzte G. J. Stoney in Dublin dann für das Atom der Elektrizität den Ausdruck «Elektron».

Die Jahrzehnte dauernden Untersuchungen der Kathodenstrahlen führten am Ende des Jahrhunderts zu drei epochemachenden Entdeckungen. Im Jahre 1895 entdeckte C. W. Röntgen [1] «eine neue Art von Strahlen», die er als «X-Strahlen» bezeichnete. Zwei Jahre später, 1897, bewies J. J. Thomson [1] endgültig, dass die schon lange Zeit vermutete Teilchenstruktur der Kathodenstrahlen der Wahrheit entspricht, d.h. dass es wirklich «elektrische Atome» gibt. Damit wurde das Elektron «entdeckt». J. J. Thomson selbst benutzte aber paradoxerweise nie den Begriff Elektron, sondern sprach immer nur über «Korpuskule». Im gleichen Jahr beschrieb F. Braun [1] «ein Verfahren zur Demonstration des

zeitlichen Verlaufes variabler Ströme» [13], womit er zum Entdecker der Kathodenstrahlröhre wurde.

Im letzten Viertel des neunzehnten Jahrhunderts wurden auch schon physikalische und technologische Grundlagen der Zwei- und Dreielektroden-Vakuum- und Entladungsröhren, Dioden und Trioden, gelegt. Bei seinen Experimenten in den Jahren 1876–1879 entdeckte in Berlin E. Goldstein die Steuerwirkung der dritten Elektrode, der «ablenkenden Kathode», auf die Kathodenstrahlen, d.h. auf die Elektronen [14]. Im Mai 1904 begann in Göttingen J. Stark mit der Herausgabe des «Jahrbuchs der Radioaktivität und Elektronik».

Leistungs-Ionik

Quecksilberdampf-Gleichrichter

Am 29. Juni 1903 fand am AIEE-Meeting in Niagara Falls eine Ausstellung von P. Cooper Hewitts [1] «Converter and the Mercury Vapor Lamp» statt. Hewitt patentierte seinen «Gleichrichter für Wechselstrom» [15] in Deutschland am 19. Dezember 1902 (Fig. 5). Es ging dabei um «ein ge-

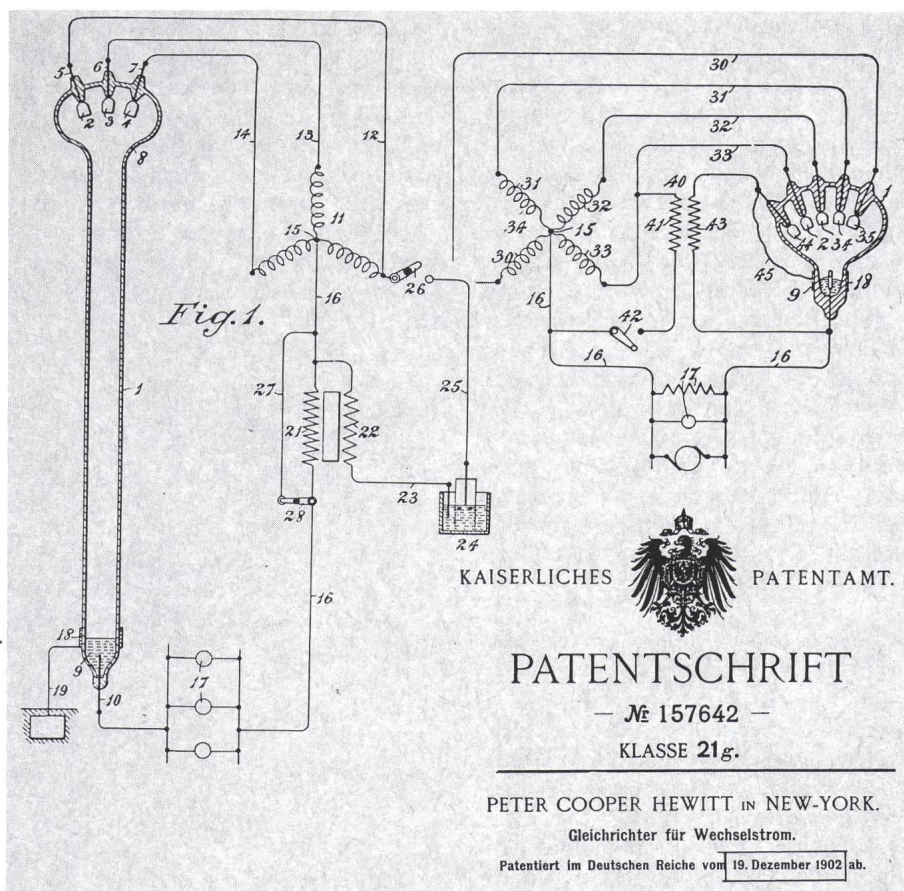


Fig. 5 P. Cooper Hewitt patentierte im Jahre 1902 den ersten Quecksilberdampf-Gleichrichter

schlossenes Gefäß mit mindestens zwei Elektroden, von denen die negative aus Quecksilber besteht». Als Beispiel wurde eine dreiphasige Gleichrichterschaltung mit Mittelpunkt aufgezeichnet. Ein Jahr später meldete Hewitts Mitarbeiter, *P. H. Thomas* [16] Stromrichter mit Anschnittsteuerung zum Patent an.

Die ersten Quecksilberdampf-Gleichrichter wurden in gläsernen Gefäßen gebaut. Die Strombelastbarkeit lag bei etwa 50 A pro Gefäß. Um die Leistung der Gleichrichter zu erhöhen war es notwendig, das Glas durch Stahlwände zu ersetzen. Die Lösung dieses vakuum-technologischen Problems gelang erstmals *B. Schäfer*, einem in Frankfurt a. M. lebenden ungarischen Techniker. Im Jahre 1912 schrieb er eine Dissertation «Über Quecksilberdampf-Gleichrichter für grosse Leistungen» [17].

Grossgleichrichter

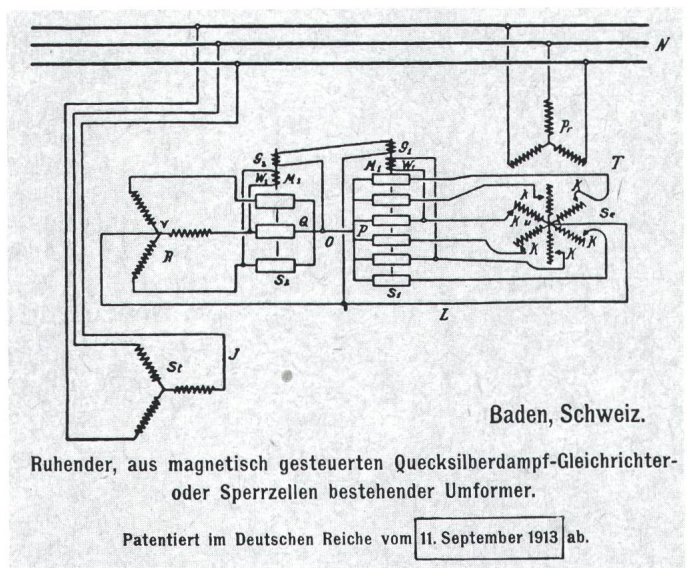
Die erste einphasige Grossgleichrichteranlage setzte Schäfer im November 1911 in Betrieb. Die Gefässe waren dauernd an einer Vakuumpumpe angeschlossen. Bei 220 V Gleichspannung betrug die Strombelastung etwa 300 A. 1912 folgten die ersten zwei Dreiphasengleichrichter von je etwa 300 kW.

Im Sommer 1913 kam *B. Schäfer* in die Schweiz, wo man mit der industriellen Herstellung der Grossgleichrichter sogleich begann. Die Schweiz und Deutschland waren vor dem Ersten Weltkrieg die einzigen Länder in Europa, welche die Quecksilberdampfgleichrichter grosser Leistung produzierten. Nach dem Krieg folgten verschiedene andere Länder. Da das wichtigste Anwendungsgebiet der Gleichrichtertechnik bei den elektrischen Bahnen lag, kam in jener Zeit in den USA, wo der individuelle Automobilverkehr in steilem Aufschwung stand, die Entwicklung der Stromrichter praktisch zum Stillstand.

Abschaltbare Ventile

Die Quecksilberdampfventile von Hewitt und Schäfer konnte man nur zünden, nicht aber löschen. Der Lichtbogen löschte selbständig und erst, wenn der Strom durch null ging. Man versuchte daher schon in den ersten Jahren auch ein universales, abschaltbares Ventil zu entwickeln. Im Jahre

Fig. 6
Schweizer Patent aus dem Jahre 1913 zur unter- und übersynchronen Drehzahlregelung eines Schleifringmotors mit Hilfe von abschaltbaren Stromrichterventilen



1913 wurde in der Schweiz eine «Elektrische Sperrzelle mit an sich unbestimmter Stromrichtung» (d.h. ein GTO-Ventil) zum Patent angemeldet [18]. Gleichzeitig wurde auch die Schaltung des Wechselrichters mit Zwangskommütierung mit Abschaltventilen und Rückwärtsdioden patentiert. Noch im gleichen Jahr wurde eine Patentschrift über eine Schaltung zur Drehzahlregelung eines Asynchronmotors (mit Schleifringen) mittels eines vollgesteuerten Umrichters mit Gleichstromzwischenkreis veröffentlicht (Fig. 6). Diese Kaskadenschaltung mit steuerbaren Abschaltventilen ermöglichte sowohl unter- als auch übersynchronen Betrieb des Induktionsmotors. Zur Realisierung der Umrichter mit abschaltbaren ionischen Ventilen kam es allerdings nicht, obwohl man noch in den dreissiger Jahren in dieser Richtung geforscht hat.

Gesteuerte Stromrichter und Umrichter

Im Jahre 1918 patentierte *F. W. Meyer* «Entladungsapparate für Zwecke der technischen Elektronik» [19]. Drei Jahre später wurde er in Braunschweig zum Privatdozenten für «Technische Elektronik» ernannt. In einem öffentlichen Vortrag über das Thema Elektronik und Starkstromtechnik sagte er damals: «Die technische Elektronik beginnt, sich als technischer Sonderzweig auszuwachsen» [20].

Obwohl das Prinzip der Gittersteuerung für die ionischen Ventile schon im Jahre 1903 von *P. H. Thomas* patentiert worden war, setzten sich die gesteuerten Stromrichter erst in den dreissiger Jahren langsam durch. Der erste Schritt zur praktischen Steuerungstechnik war 1923 das Verfahren des Pariser *P. M. G. Toulon* [21], das eine stetige Phasenverschiebung der Steuerspannung ermöglichte (Fig. 7).

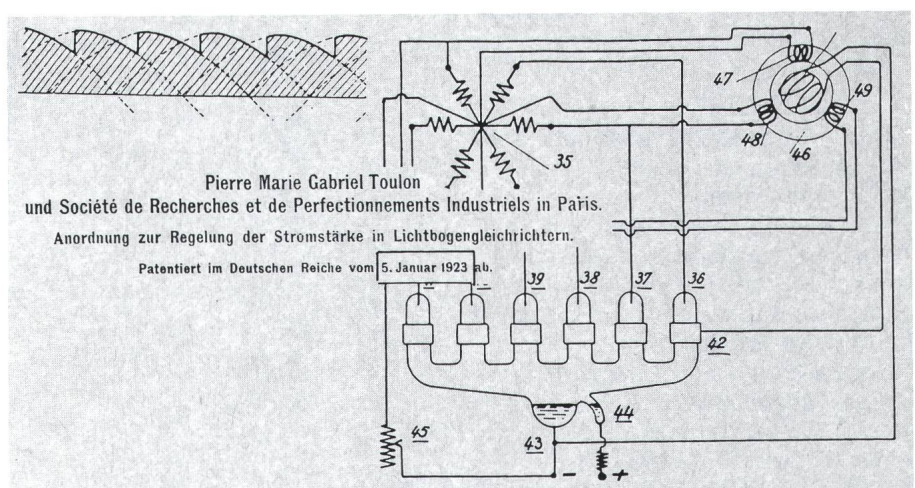


Fig. 7 Methode der Gittersteuerung von P.M.G. Toulon aus dem Jahre 1923

Aber erst der magnetische Verstärker, der Transduktor, bei dessen Entwicklung *U. Lamm* in Schweden eine besondere Rolle spielte, ermöglichte einen breiteren Einsatz von gesteuerten ionischen Ventilen mit Quecksilberkathode in den fünfziger und sechziger Jahren. Dank der Erfindung des Transistors, 1948, war es in den sechziger Jahren auch schon möglich, die Steuerung der ionischen Ventile mittels Halbleitertechnik durchzuführen.

In der Zwischenkriegszeit, 1918–1939, wurden mit den vorhandenen ionischen Ventilen wichtige Schaltungen der Stromrichtertechnik entwickelt. Der Direktumrichter, zum Beispiel, stammt von *F. W. Meyer* aus dem Jahre 1922, das Prinzip des Gleichstromstellers (Chopper) fand *W. Burstyn* im Jahre 1924, und *M. Schenkel* schlug im Jahre 1932 einen Umrichter zur Blindleistungssteuerung vor. *M. Stöhr* zeichnete 1932 als erster eine Schaltung für die Gleichspannungs-Fernübertragung. *J. von Issendorf* kam 1935 mit der Anwendung des Direktumrichters zur Schlupfleistungsregelung eines Asynchronmotors. *H. Starke* und *R. Schroeder* beschrieben 1931 die Serieschaltung von Ventilen. *E. Kern* benützte die Gittersperre als Kurzschlusschutz. *C.A. Sabbah* patentierte 1932 die Zwangskommutierung mit Kondensatorlöschung. Der Wechselstromsteller wurde von *P. Lenz* und die zwölfpulsige Schaltung von *H. Meyer-Delius* untersucht. Von *E.F.M. Alexanderson*, einem gebürtigen Schweden, wurde in Amerika 1934 der «Thyatron-Motor» entwickelt. In Deutschland wurde der Quecksilberdampf-Gleichrichter in jener Zeit zum Antrieb einer Fördermaschine in Gruben und auch auf einer Lokomotive eingesetzt. In Basel wurde eine Netzkupplung 50 Hz–16 $\frac{2}{3}$ Hz mit Direktumrichter in Betrieb gesetzt.

Hochspannungs-Gleichstromübertragung

Ab 1930 wurden Vorschläge zur Hochspannungs-Gleichstrom-Energieübertragung (HGUe) gemacht. Schon an der Weltkraftkonferenz in Tokio, 1929, war über dieses System diskutiert worden. In Russland versuchte *A. N. Larionow*, die Hochspannungs-Gleichstromübertragung ab 1931 durchzusetzen. Der positive Entscheid fiel dann 1940. Im Jahre 1936 wurde in den USA mit einer HGUe

mit Thyatronen experimentiert. In der Schweiz wurden 1939 Wettingen und Zürich versuchsweise mit hochgespanntem Gleichstrom mit mehranodigen Quecksilberdampf-Gleichrichtern verbunden.

Im August 1941 begann der Bau der ersten HGUe-Grossanlage Elbe–Berlin. Gleichzeitig wurde in Deutschland ein Entwurf eines interkontinentalen HGUe-Netzes London–Paris–Prag–Berlin–Kiew ausgearbeitet. In Schweden ging 1954 die erste HGUe-Verbindung Gotland–Festland (100 kV) in Betrieb. 1951 stand auch schon die erste russische Fernverbindung Kaschira–Moskau unter Gleichspannung von 200 kV. Die deutsche Anlage Elbe–Berlin wurde 1945 noch vor der Inbetriebsetzung demontiert. Sie diente dann als Grundlage für das erste russische Projekt.

Die HGUe war dasjenige Gebiet der Leistungselektronik, wo sich die ionischen Ventile am längsten hielten. 1961 wurde mit dieser Technik Frankreich mit England verbunden. Erst in den siebziger Jahren wurde auch bei HGUe die Ionik durch Halbleiterelektronik ersetzt.

Ignitron-Lokomotiven

Die Elektrifizierung der Eisenbahnen sowohl mit Gleichstrom als auch mit Wechselstrom bildete für die Gleichrichtertechnik von Anfang an einen der grössten Abnehmer. Noch vor dem Ersten Weltkrieg wurde in den USA ein Triebwagen mit Quecksilberdampf-Glasgleichrichtern gebaut. In der Zwischenkriegszeit, 1936, wurde in Deutschland eine Gleichrichterlokomotive erprobt. Die Elektrifizierung mit Industriestrom, 50 Hz, die ab Mitte der fünfziger Jahre in vielen Ländern einsetzte, führte zur Serieproduktion von Ignitron-Gleichrichterlokomotiven. Besonders Frankreich und Russland waren hier führend. In den sechziger Jahren lag die jährliche Produktion in Russland bei etwa 400 Lokomotiven.

Das Ignitron, ein einanodiges Quecksilberdampf-Gleichrichterventil mit Stifzündung, wurde 1931 in den USA von *J. Slepian* entwickelt. Dank der flüssigen Quecksilberkathode waren die Ignitrons den mit Glühkathode ausgerüsteten Thyatronen (1929, *A. W. Hull*) leistungsmässig weit überlegen. Sie sind funktionsmässig die echten Vorläufer der heutigen Thyristoren.

Schaltungstheorie

Die erste mathematische Untersuchung über den Zweipulsstromrichter wurde von *C.P. Steinmetz* im Jahre 1905 durchgeführt. Eine grundlegende Arbeit betreffend die Theorie der Mehrpulsstromrichter veröffentlichten 1924 die Schweizer *W. Dällenbach* und *E. Gerecke*. In den dreissiger Jahren baute *W. Dällenbach* in Zürich auch den ersten Quecksilberdampf-Gleichrichter ohne Vakuumpumpe. Er erkannte ferner als erster die Symmetrie der Kennlinien des netzgeführten Gleichrichters und Wechselrichters.

Die Theorie und Analyse der Stromrichterschaltungen wurde in den Jahren 1930–1960 besonders durch die Arbeiten von *K.E. Müller-Lübeck*, *O.K. Marti* und *H. Winograd*, *M. Demontvignier*, *W. Schilling*, *E. Uhlmann*, *I.L. Kaganow* und *Th. Wasserrab* bereichert. Seit Anfang der sechziger Jahre werden zur Berechnung und Untersuchung von Stromrichtern Automaten eingesetzt. Eine der ersten grösseren Arbeiten betreffend die Anwendung des Computers für Stromrichterberechnungen ist 1964 in Prag erschienen.

Publikationen

Im Jahrzehnt von 1910 bis 1920 wurden über Quecksilberdampf-Gleichrichter knapp einhundert Arbeiten veröffentlicht. Von 1920 bis 1930 stieg die Zahl der Veröffentlichungen schon auf etwa 350. Der erste, der neben *B. Schäfer* über die Gleichrichter eine Doktor-Dissertation schrieb, war *W. Tschudy* an der ETH Zürich, 1912, [22]. Das erste Buch über Stromrichter erschien 1915 in Wien/Leipzig [23]: «Elektrische Umformer und Gleichrichter». Im Jahre 1938 schrieb *K. Maier* das erste Buch über Leistungs-Halbleitergleichrichter [24].

Die erste und einzige Zeitschrift, die sich der Stromrichtertechnik voll gewidmet hat, ist «Direct Current», die ab Juni 1952 in London während zwei Jahrzehnten herausgegeben wurde. Die Beiträge von *H. von Bertele* (Wien), *Ch. Ehrensperger* (Schweiz), *U. Lamm* (Schweden), *J.E. Calverley* (England) und *M. Hoyaux* (Belgien) haben deren erste Jahrgänge geprägt. Die erste internationale Konferenz über Stromrichter, «Rectifier in Industry», fand 1952 in Pittsburg statt.

Die Leistungs-Halbleiterelektronik

Dioden

Der Begriff «Halbleiter» ist zwar seit 1783 in der Elektrophysik geläufig (Fig. 8), und man weiss auch schon seit 1802, dass die Halbleiter für den Strom eine «unipolare» Wirkung aufweisen können, aber zur praktischen Anwendung der Festkörperelemente zur Gleichrichtung kam es erst am Anfang des zwanzigsten Jahrhunderts.

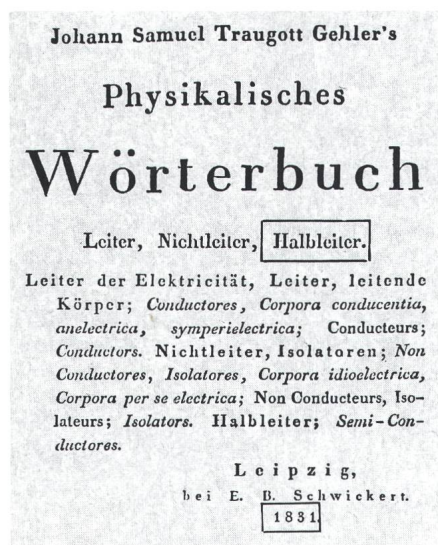


Fig. 8 Zum Begriff des Halbleiters

Den Begriff «halb-leitend» führte A. Volta 1783 in die Elektrophysik ein. Am Anfang des 19. Jahrhunderts war dann der «Halbleiter» ein sehr oft verwendeter Begriff, wie es auch das «Physikalische Wörterbuch» von Gehler beweist.

Im Jahre 1904 patentierte F. Pawlowski in Wien eine «Gleichrichterzelle mit festen Elektrolyten» [25]. Das Grundmaterial bildete dabei «Halbleiterschweifkupfer». Als Beispiel der Anwendung wurde eine kompakte Brückenschaltung aufgezeichnet. Ein Jahr später schrieb O. Weigel in Göttingen eine Dissertation «Zur Kenntnis fester unipolarer Leiter» [26]. Im Jahre 1906 erschien in «Electrical World» eine kurze Notiz von G. W. Pickard, in welcher er über einen Silizium-Detektor, d.h. eine Diode, berichtete [27]. Eine umfangreiche Untersuchung über «Crystal Rectifiers» veröffentlichte G. W. Pierce in den Jahren 1906 und 1907 in «Physical Review» [28]. Sie enthält die ersten Strom-Spannungs-Kennlinien der Dioden. Deren Sperrspannung lag dabei bei etwa 10 V, der Strom bei einigen mA.

In der Zwischenkriegszeit wurden polykristalline Selen-Gleichrichter für höhere Leistungen eingesetzt. Dass Selen eine Gleichrichterwirkung aufweist, war schon sehr viel früher, im Jahre 1876, von W. Siemens [1] in Deutschland und W. G. Adams in England entdeckt worden.

Während des Krieges (1940–1945) wurden leistungsschwache Dioden mit Germanium als Halbleiter bei Radaranlagen eingesetzt. Zu Beginn der fünfziger Jahre kam es zum Einsatz der ersten Germanium-Leistungsdioden. In den USA wurden 1953 Dioden für 100 A entwickelt. Im Jahre 1955 folgten Deutschland, die Sowjetunion, Grossbritannien und die Schweiz. Das erste Schienenfahrzeug mit Germaniumdioden wurde im Frühling 1956 in Grossbritannien in Betrieb gesetzt.

Die Leistungsdioden mit Silizium erschienen nur wenig später als die Germaniumdioden. Ab Ende der fünfziger Jahre wurden Gleichrichterlokomotiven mit Siliziumdioden ausgerüstet. Frankreich, Japan, Deutschland (1959), die Tschechoslowakei und die Sowjetunion (1961) waren die ersten, die sie lieferten. Der erste Grosseinsatz von Silizium-Lokomotiven deutscher Produktion spielte sich auf der vorkaukasischen Eisenbahnlinie bei Rostow im Jahre 1961 ab.

In den dreissiger Jahren wurden die Grundlagen der Halbleitertheorie aufgebaut. In England führte A. H. Wilson 1931 den Begriff «Loch» in die Halbleiterphysik ein. B. Davydow in Russland (1936) und der aus Zürich stammende W. Schottky (1939) in Deutschland setzten die Theorie fort. Im Jahre 1941 sprach J. H. Scaff in einem USA-Patent zum ersten Mal über «P»- und «N»-Schichten.

Thyristoren

In der zweiten Hälfte der zwanziger Jahre wurden die ersten Versuche zur Entwicklung steuerbarer Halbleiterelemente unternommen. J. E. Lilienfeld in New York patentierte ein Dreielektroden-Festkörperelement. In Berlin wurde 1930 ein Kontaktgleichrichter zum Patent angemeldet [29] «mit zwei durch eine Sperrschicht getrennte Metallelektroden, dadurch gekennzeichnet, dass zwischen den Hauptelektroden eine Steuerelektrode untergebracht ist».

Im Jahre 1957 hörten die Elektrotechniker zum ersten Mal das Wort

«Thyristor» [30]. Silizium-Thyristoren hoher Leistung werden ab Mitte der sechziger Jahre angewendet.

Ende der sechziger Jahre wird allmählich weltweit die Produktion der ionischen Stromrichterventile eingestellt und man geht voll auf die Halbleiterelemente über.

Literatur

- [1] H. Wüger: Pioniere der Elektrotechnik. Rubrik im Bulletin SEV/VSE: Johannes I. Bernoulli 1667...1748. 65(1974)1, S. 24.
Carl Ferdinand Braun 1850...1918. 66(1975)20, S. 1122.
Sir Humphrey Davy 1778...1829. 69(1978)24, S. 1325.
Charles François Du Fay de Cisternay 1698...1739. 55(1964)22, S. 1133.
Michael Faraday 1791...1867. 57(1966)20, S. 930.
Jean Bernard Léon Foucault 1819...1868. 69(1978)20, S. 1102.
Heinrich Geissler 1815...1879. 63(1972)4, S. 197.
Stephan Gray, etwa 1670...1736. 61(1970)18, S. 833.
Peter Cooper Hewitt 1861...1921. 62(1971)25, S. 1199.
Johann Wilhelm Hittorf. 1824...1914. 56(1965)5, S. 165.
Moritz Hermann von Jacobi 1801...1874. 65(1974)13, S. 973.
Abbé Jean Antoine Nollet 1700...1770. 62(1971)20, S. 977.
Georg Simon Ohm 1787...1854. 53(1962)12, S. 599.
Julius Plücker 1801...1868. 67(1976)17, S. 931.
Johann Christian Poggendorff 1796...1877. 68(1977)9, S. 453.
Johann Wilhelm Ritter 1776...1810. 65(1974)16, S. 1208.
Wilhelm Conrad Röntgen 1845...1923. 61(1970)26, S. 1269.
Werner von Siemens 1816...1892. 57(1966)12, S. 537.
Karl August Rudolf Steinmetz 1865...1923. 57(1966)7, S. 334.
Joseph John Thomson 1856...1940. 56(1965)25, S. 1118.
Alessandro Volta 1745...1837. 61(1970)7, S. 318.
Wilhelm Eduard Weber 1804...1891. 57(1966)18, S. 850.
Sir Charles Wheatstone 1802...1875. 67(1976)4, S. 181.
- [2] Joh. Bernoulli: Sur le phosphore du baromètre. Histoire de l'Académie Royale des Sciences 3(1701)–, p. 1...8.
- [3] F. Hauksbee: Physico-mechanical experiments on various subjects. Second edition. London, J. Senex, 1719.
- [4] Saggi di naturali esperienze fatte nell'Accademia del Cimento. Firenze, Giuseppe Cocchini, 1667.
- [5] W. Henly: Some experiments to ascertain the direction of the electric matter. Philosophical Transactions, London 64(1774).
- [6] Les grands avantages d'une espèce d'isolement très imparfait. Observations sur la Physique 22(1783)–, p. 325...350.
- [7] F. Braun: Über Abweichungen vom Ohmschen Gesetz in metallisch leitenden Körpern. Annalen der Physik und Chemie, Neue Folge 1(1877)1, S. 95...110.

- [8] *J.M. Gaugain*: Note sur un appareil électrique qui fait fonction de soupape. Comptes rendus Hebdomadaires des Séances de l'Académie des Sciences 40(1855)-, p. 640...642.
- [9] *C. Pollak*: Elektrolytischer Stromunterbrecher und Umformer. Deutsches Reichspatent Nr. 92564 vom 14. Januar 1896.
- [10] *L. Graetz*: Elektrochemisches Verfahren, um Wechselströme in Gleichströme zu verwandeln. ETZ 18(1897)29, S. 423...424.
- [11] *L. Kallir*: Gleichrichtung von Wechselströmen durch elektrische Ventile. Zeitschrift für Elektrotechnik 16(1898)51, S. 602...604, und Nr. 52, S. 613...615.
- [12] *C.G. Kessleri*: De motu materiae electricae. Breslau, Joannem Jacobum Kornium, 1747.
- [13] *F. Braun*: Über ein Verfahren zur Demonstration und zum Studium des zeitlichen Verlaufes variabler Ströme. Annalen der Physik und Chemie, Neue Folge 60(1897)3, S. 552...559.
- [14] *E. Goldstein*: Eine neue Form elektrischer Abstossung. Berlin, Springer-Verlag, 1880.
- [15] *P. Cooper Hewitt*: Gleichrichter für Wechselstrom. Deutsches Reichspatent 157642 vom 19. Dezember 1902.
- [16] *P. Cooper Hewitt*: Regelung von Gleichstromverteilungsnetzen. Deutsches Reichspatent Nr. 163868 vom 25. Juli 1903.
- [17] *B. Schaefer*: Über Quecksilber-Gleichrichter für grosse Leistungen. Dissertation der Technischen Hochschule Darmstadt 1913.
- [18] Elektrische Sperrzelle mit an sich unbestimmter Stromrichtung. Deutsches Reichspatent der Firma Brown Boveri AG, Nr. 317598 vom 23. Juli 1913.
- [19] *F.W. Meyer*: Emissions- und Entladungsgeschwindigkeit für Zwecke der technischen Elektronik. Deutsches Reichspatent Nr. 431596 vom 29. Januar 1921.
- [20] *F.W. Meyer*: Die freiströmende Elektrizität der technischen Elektronik und die Entwicklung der Starkstromtechnik und des Maschinenbaues. ETZ 42(1921)26, S. 689...693.
- [21] *P.M.G. Toulon*: Anordnung zur Regelung der Stromstärke in Lichtbogengleichrichtern. Deutsches Reichspatent Nr. 415910 vom 5. Januar 1923.
- [22] *W. Tschudy*: Experimentelle Untersuchungen am Quecksilberdampf-Gleichrichter für Wechselstrom. Dissertation der ETH Zürich 1912.
- [23] *K. Riemenschneider und E. Welter*: Elektrische Umformer und Gleichrichter. Ihre Theorie und Betriebsverhältnisse. Wien/Leipzig, A. Hartlebens Verlag, 1915.
- [24] *K. Maier*: Trockengleichrichter. Theorie, Aufbau, Anwendung. München/Berlin, Verlag R. Oldenbourg, 1938.
- [25] *F. Pawlowski*: Gleichrichterzelle mit festen Elektrolyten. Deutsches Reichspatent Nr. 163882 vom 2. August 1904.
- [26] *O. Weigel*: Beiträge zur Kenntnis fester unipolarer Leiter. Dissertation der Universität Göttingen, 1905.
- [27] *G.W. Pickard*: Means for receiving intelligence communicated by electric waves. US Patent Nr. 836 531, November 20, 1906.
- [28] *G.W. Pierce*: Crystal rectifiers for electric currents and electric oscillations. Physical Review 25(1907)1, p. 31...60.
- [29] Kontaktgleichrichter mit zwei durch eine Sperrschicht getrennte Metallelektroden. Österreichisches Patent der AEG Nr. 130102 vom 11. Juli 1930.
- [30] *C.W. Müller and J. Hilibrand*: The "thyristor". A new high-speed switching transistor. I.R.E. Transactions on Electron Devices 5(1958)1, p. 2...5.