Rückblick auf die Entwicklung der pumpenlosen Quecksilberdampfstromrichter mit Eisengefäss und Edelgasfüllung

Autor(en): **Gerecke, Ed.**

Objekttyp: **Article**

Zeitschrift: **Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins : gemeinsames Publikationsorgan des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins (SEV) und des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätswerke (VSE)**

Band (Jahr): **53 (1962)**

Heft 7

PDF erstellt am: **29.05.2024**

Persistenter Link: https://doi.org/10.5169/seals-916919

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

Gemeinsames Publikationsorgan des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins (SEV)
und des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätswerke (VSE)

Rückblick auf die Entwicklung der pumpenlosen Quecksilberdampfstromrichter mit Eisengefäss und Edelgasfüllung

Von *Ed. Gerecke*, Zürich

621.314.651.001.6

Es werden die Schwierigkeiten besprochen, die bei der Entwicklung der pumpenlosen Quecksilberdampfgleichrichter mit Stahlgefäss auftraten. Insbesondere wird die Rolle der Verunreinigungen beim Entstehen von Rückzündungen und diejenige der Edelgasfüllung zur Vermeidung von Überspannungen beschrieben.

L'article traite des difficultés qui se sont opposées au développement des redresseurs scellés, à vapeur de mercure et à cuve métallique. L'auteur démontre le rôle important que jouent les impuretés pour les allumages en retour et celui d'une atmosphère à gaz rare pour la suppression des surtensions.

1. Die Zeit von 1902 bis 1922

Im folgenden soll rückschauend über Schwierigkeiten bei der Entwicklung der Quecksilberdampfgleichrichter berichtet werden, über welche bisher wegen der Geheimhaltepflicht nur wenig veröffentlicht wurde, die aber für deren Wirkungsweise und Betriebssicherheit entscheidend sind. Der Quecksilberdampfstromrichter hat heute eine sehr hohe Entwicklungsstufe und Betriebssicherheit erreicht, wofür eine Unmenge von Entwicklungsarbeiten durchgeführt werden mussten. Maschinen, Geräte und technische Verfahren zeigen, historisch gesehen, einen ähnlichen «Lebenslauf» wie Lebewesen, eine «Jugend» mit Kinderkrankheiten, dann das «reife Mannesalter», wo sich der Umsatz erfreulich zu gestalten beginnt, und alsdann die Zeit der «Stille und des Abtretens», ja des Verdrängtwerdens durch jüngere Entwicklungen und wirksamere Verfahren und Apparate. Als Beispiel sei der Einankerumformer erwähnt, der seinerzeit die Umformung von Drehstrom in Gleichstrom vermittels eines rotierenden Ankers ermöglichte, welcher damals eine hohe Entwicklungsstufe erreicht hat und heute ausgestorben ist. Er wurde durch den Quecksilberdampfgleichrichter verdrängt, der neben vielen weiteren Vorzügen als statischer Umformer einen höheren Wirkungsgrad aufweist. Aber auch diesem ist bereits im nichtsteuerbaren und steuerbaren Siliziumventil ein Nachfolger erstanden.

In der neuesten Zeit geht die Entwicklung neuer Produkte immer rascher vor sich, und die Entwicklungsarbeiten nehmen daher bei den Firmen einen immer grösseren Raum ein. Es gibt Grossfirmen, bei denen die Hälfte des heutigen Absatzes aus Produkten besteht, die vor 20 Jahren unbekannt waren. Es müssen sich daher immer mehr Personen sowohl mit der obersten Führung von Forschungs- und Entwicklungsaufgaben, als auch mit deren eigentlicher Durchführung beschäftigen. Die Umstände und Schwierigkeiten, unter denen sich diese abspielen, zeigen in vielen Fällen ganz ähnliche Züge, und es dürfte daher von Interesse sein, an dem Beispiel des Quecksilberdampfgleichrichters, das dem Autor besonders nahe steht, den Werdegang einer neuen Technik zu schildern.

Die Geheimnisse der Natur werden dem Menschen meist durch Zufall bekannt. So fand *Peter Cooper Hewitt* in USA 1902 beim Bau von Quarzlampen den «*Gleichrichtereffekt*». Er baute daraufhin kleinere Glasgleichrichter und stiess dabei auch bereits auf das Versagen des Gleichrichtereffektes, auf die «*Rückzündung*». Vom begrifflichen Standpunkt aus war damit der Elektrotechnik ein neues Gebiet erschlossen worden, nämlich das der «Gleichrichtung» eines Wechselstromes mit ruhenden Mitteln, also ohne Kollektor. Es folgte dann die industrielle Verwertung, zunächst in Glasgefässen, dann, als neue schöpferische Aufgabe, der Übergang zu Eisengefässen durch *Béla Schäfer* bei Hartmann und Braun in Frankfurt, etwa um 1912. Es ist dem Weitblick der Direktion der Firma Brown, Boveri & Cie. in Baden zu verdanken, dass sie Béla Schäfer die Weiterführung seiner Arbeiten in Baden ermöglichte, wodurch sich BBC während Jahren einen Vorsprung auf diesem Gebiet sicherte. Er hatte sich eine enorm schwierige Aufgabe gestellt, denn die Hochvakuumtechnik und die Entladungsphysik waren damals vollständig in den Kinderschuhen. Die ersten Eisengefässe wiesen Anodenströme von 10...20 A auf, was dazu gezwungen hat, Schaltungen zum Parallelarbeiten von Lichtbögen zu entwickeln, um auf Kathodenströme von einigen hundert Ampere zu gelangen. Die genau gleiche Situation hat sich jetzt 40 Jahre später beim Bau von Siliziumgleichrichtern wiederholt. Beim Übergang zu grösseren Leistungen, etwa 1000 A bei 600 V, zeigten sich damals ganz grosse Schwierigkeiten im Betrieb, es traten sehr häufig, oft täglich, Rückzündungen auf, die ja einen Kurzschluss des Transformators und auch der Gleichstromseite bewirken. Beim Öffnen der schadhaften Gefässe fand man, dass Anoden, Hülsen und Jalousien teilweise geschmolzen und die Hülsen sowie der «Sammler» mit Lichtbogenspuren (Eisblumen) direkt übersät waren. Es kam auch vor, dass der automatische Gleichstromschalter zu einem unförmigen Klumpen aus Eisen und Kupfer zusammengeschmolzen war. Die

Schwierigkeiten waren so gross, dass man zeitweise starke Zweifel an der industriellen Verwertungsmöglichkeit hegte. Ähnliche Schwierigkeiten traten auch bei der General Electric in USA auf, welche 1928 den Bau von eisernen Quecksilberdampfgleichrichtern einstellte.

Die damalige Direktion von BBC beauftragte 1921 Dr. *W. Dällenbach* mit dem Studium dieser so lästigen Rückzündungen. Der Autor trat 1922 als frischgebackener Absolvent der ETH der inzwischen gebildeten kleinen Forschungsgruppe bei. Dr. *W. Dällenbach* vertrat von Anfang an die Meinung, dass es sich hier selbst für den Wissenschafter um Neuland handle und eine systematische wissenschaftliche Bearbeitung des gesamten Gebietes unumgänglich sei. Die Gruppe der «Praktiker» verlangte rasche Lösungen, die sie jedoch selbst nicht angeben konnte, und bedrängte die «Wissen»schafter, denen das einschlägige «Wissen» ja fehlte und die für die Durchführung ihrer physikalischen Grundlagenversuche scheinbar äusserst lange Zeiten benötigten. Ähnliche Konflikte stellen sich auch heute immer wieder bei Forschungsarbeiten ein, vielleicht noch in verschärftem Masse, da heute die Anzahl der konkurrierenden Forscher erheblich grösser und damit auch die «Geschwindigkeit» der Forschung viel höher ist. Der Praktiker will liefern, er will Anlagen bauen und den Markt erobern. Der Wissenschafter zögert, er hat nicht genügende Kenntnisse und befürchtet Rückschläge bei Lieferungen.

Das zweckmässige Vorgehen besteht darin, ein arbeitsfähiges und mit genügend Mitteln ausgerüstetes «Team» zu bilden, das sich mit den grundsätzlichen theoretischen, physikalischen und technischen Problemen beschäftigt, zu Prototypen vordringt und mit diesen auf industriellen Anlagen Versuche durchführt, um das gesamte Gebiet abzutasten und um sich die nötigen Kenntnisse von den noch unbekannten Erscheinungen und Kinderkrankheiten zu erwerben. Dabei spielt jedoch die Kostenfrage oft eine wesentliche Rolle. Ein Verkaufserfolg ist ja noch nicht abzusehen, oft müssen sogar die Versuchsanlagen auf Jahre hinaus kostenlos geliefert werden. Man ist noch nicht einmal sicher, ob sich das Produkt in der Zukunft durchsetzen wird und soll trotzdem die hohen Entwicklungskosten übernehmen! Das sind alles schwierige Aufgaben für die oberste Geschäftsführung und insbesondere für Schweizerfirmen, die sich gegen die grosse und kapitalstarke ausländische Konkurrenz behaupten müssen.

2. Die Rolle der Verunreinigungen

In der ersten Zeit unterstand der Bau der von *Béla Schäfer* entworfenen Gefässe der Dampfturbinenabteilung von BBC, da es sich offensichtlich um Apparate des Maschinenbaues handelte. Die lösbaren Vakuumdichtungen an den Isolatoren und an der grossen Rundnaht wurden nach seinen Ideen mit Asbest und Quecksilber hergestellt. Die kleine Forschungsgruppe von Dr. *W. Dällenbach* beschäftigte sich zunächst mit der Frage: Was geschieht physikalisch während der Sperrperiode einer Anode? Es zeigte sich ein starker Glimmstrom, der durch die um die Anode angebrachte «Hülse» wesentlich reduziert wurde. Wie geht nun der Umschlag dieser Glimmentladung in den Lichtbogen vor sich, also die Einleitung einer Rückzündung? Zur Klarstellung dieser Frage wurden die Vorgänge an der Kathode einer Glimmentladung in besonderen demontierbaren Glasgefässen untersucht. Dabei traten an der Kathode sporadisch kleine Funken auf. Deren Anzahl war bei der Inbetriebnahme besonders gross, bei längerer Betriebsdauer verschwanden sie weitgehend. Es war offensichtlich, dass es sich um Verunreinigungen auf dem Kathodenmetall handeln musste, welche den Umschlag der Glimmentladung in den Lichtbogen begünstigten, falls die Spannungsquelle genügend stark war. Eine systematische Untersuchung von solchen, auf die Kathode gebrachten Zündsubstanzen ergab, dass Oxyde der Alkali- und Erdalkalimetalle sowie Asbest besonders aktiv wirkten, während reines Eisen, Molybdän und Graphit die Funken nicht zeigten [1] [1]). Damit war eine sehr wesentliche Forderung für den Bau von Stromrichtern gefunden worden: die Anodenoberflächen müssen äusserst rein sein und rein bleiben. Die Frage, ob die Anoden durch den Betrieb verunreinigt werden können, liess sich experimentell dahin beantworten, dass der Lichtbogen selbst die Eigenschaft hat, feine Substanzen durch elektrische Aufladung von der Kathode zur Anode zu transportieren! Während der Leitperiode können «zündende» Substanzen auf die Anode gelangen [1], sie können aber auch während der Sperrperiode durch das Ionenbombardement des Glimmstromes wieder entfernt werden. Man weiss heute, dass die Elektronenemission enorm stark von der Austrittsarbeit der Elektronen abhängt und damit über viele Zehnerpotenzen variieren kann. Die Emission ist bei Eisen und Graphit klein und bei den «Verunreinigungen» sehr hoch.

Die Oxydkathoden beruhen ja auf diesem Effekt. Nun hatte *Béla Schäfer* zwischen dem unteren Rand des Anodenisolators und dem oberen Ende der Eisenanode einen Asbestring für Dichtungszwecke vorgesehen, der also in direkter Berührung mit der Anode war und daher die Möglichkeit von Rückzündungen in sich barg. Der nächste Vorschlag ging daher dahin, die Anodenhülse um die Anode herum zu verengen, um der Entladung zum Asbestring den Zutritt zu verwehren. Der Versuch ergab etwas Überraschendes, dass nämlich der Nennstrom der Gefässe reduziert wurde. Wir wissen heute, dass dadurch der «Grenzstrom» verringert wurde. Man konnte sich das Dilemma damals nicht erklären und machte die Hülsen wieder weiter. Ferner zeigte sich, dass die Glasur der Anodenisolatoren oberhalb der Anoden schmolz. Warum? Ein weiterer Vorschlag ging dahin, den Asbestring wegzulassen, was jedoch wieder zu einer neuen Überraschung führte: die Zahl der Rückzündungen stieg enorm! Klopfte man mit einem Holzhammer auf eine solche «Flaschenhalsanode», so trat augenblicklich eine Rückzündung ein. Die Amerikaner nannten später diese Art von Rückzündungen «5-Minuten-Rückzündungen», da sie beim Anfahren der Gefässe innerhalb der ersten 5 min erfolgten. Sie rühren von Quecksilbertropfen her, die sich oben am Anodenhals durch Kondensation bilden und auf die heisse Anode herunterfallen.

Es ist dies ein ganz typisches Beispiel. Die Erkenntnis, Asbest zu vermeiden, steht heute ausser jedem Zweifel. Ungeeignet waren jedoch die damaligen Mittel, sie führten sofort zu Rückschlägen, die viel schlimmer waren. Es waren eben noch nicht alle massgebenden Erscheinungen bekannt, und man ersetzte unbewusst ein Übel durch ein noch schlimmeres. Bei Entwicklungsarbeiten treten oft solche Dilemmas auf. Man muss einen Weg durch einen Urwald finden, von dem

[1]) Siehe Literatur am Schluss des Aufsatzes.

man keinen Plan besitzt, und fällt von einem Sumpf in den andern. Die Anforderungen an die Konstruktion der Stromrichtergefässe sind eben in vielen Fällen widersprechend, und es handelt sich dann darum, einen Kompromiss zu schliessen. Diese Situationen erinnern lebhaft an die Durchfahrt der alten Griechen durch die Meerenge der Skylla und Charybdis in Homers Odyssee. Die Folgerungen aus diesen Versuchen waren peinlich: Vermeiden des Asbestes sowie aller Verunreinigungen im gesamten Inneren der Gleichrichtergefässe, also äusserste Reinheit, «Verstecken» der Isolatoren und Vermeiden von Restgasen, was auf eine völlige Neukonstruktion hinauslief. Zu den Methoden des Maschinenbaues kamen also neue und sehr ungewohnte, ja merkwürdige Forderungen der Vakuumtechnik und der Gasentladungsphysik hinzu.

Es ist das Verdienst von Dr. *W. Dällenbach,* diesen Weg klar erkannt zu haben. Er gründete 1925 und leitete in der Folge eine kleine private zürcherische Studiengesellschaft [«Syndikat für Technische Physik»] zur Lösung dieser konstruktiven Aufgaben und ging gerade noch einen Schritt weiter, der damals als sehr kühn erschien: er proponierte den Bau pumpenloser Gefässe. Er bezweckte damit, einen physikalisch einwandfreien, sauberen und definierten Zustand im Entladungsraum zu erhalten. Bei der Verwirklichung stellten sich dann sehr grosse technische Schwierigkeiten ein, von welchen man bei der Gründung wirklich keine Ahnung hatte. «Pumpenlos» bedeutet nicht nur, dass die Pumpe weggelassen und damit eine kleine Preisreduktion erreicht wird, es bedeutet viel, viel mehr! Pumpenlos heisst ja auch, dass man das Gefäss während seiner ganzen industriellen Lebensdauer auf der Anlage nicht mehr öffnen kann. Dieses unscheinbare Adjektiv schliesst also die Versicherung des Erbauers in sich, dass das Gefäss während Jahrzehnten dicht sein wird und nicht nachgast, dass man dieses z. B. 10 Jahre lang im Lager stehen lassen und dann sofort, ohne jede Formation, in Betrieb nehmen kann, dass im Innern keine Metalle schmelzen werden, dass die Zündanode weder hängen bleiben noch abschmelzen wird, dass die Anodenisolatoren nicht durch schädliche Überspannungen zersplittert werden und vieles mehr. Pumpenlos bedeutet also auch, dass der Erbauer seine Aufgabe sehr ernst genommen und sie durch wissenschaftliche und technisch-schöpferische Arbeiten bis zum Endziel geführt hat. Es dürfte damit auch verständlich sein, warum seinerzeit bei vielen Gleichrichterkonstrukteuren das Wort «pumpenlos» wie ein Schreckgespenst wirkte.

3. Dichte und entgaste Gefässe

Da die Gefässe zur Entgasung aller dem Vakuum zugekehrten Flächen in einer Heizformation auf 400 ...450 °C unter Vakuum erwärmt werden müssen, stellte sich zunächst die Aufgabe der Konstruktion einer ausheizbaren isolierenden schraubenfreien Elektrodeneinführung. Zunächst wurde eine Glasrohreinführung von 50...65 mm Durchmesser gewählt, welche aus einer speziellen Glassorte und 2 Chromeisenrohren bestand und mittels elastischer Membranen mit dem Gefäss einerseits und mit dem stromeinführenden Leiter anderseits verschweisst wurde. Zur Verhinderung von Durchschlägen vakuumseitig wurden entsprechend dem Gesetz von *Paschen* besondere zylindrische Elektroden mit *kleinen* gegenseitigen Abständen eingebaut. 1934 wurde das Glasrohr durch ein Steatitrohr ersetzt, das mittels eines Glasschmelzflusses mit den chromeisernen Kappen und Kragen verschmolzen wurde. Diese Konstruktion ist mechanisch und elektrisch äusserst fest und widerstandsfähig. Ferner wurden am ganzen Gefäss alle Schraubverbindungen eliminiert und durch geeignet gestaltete Verschweissungen ersetzt. Weiter wurde in der Studiengesellschaft das sog. Ammoniakverfahren zur Prüfung der Dichtigkeit aller Einzelteile und des gesamten Gefässes entwickelt, bei welchem NH_3 unter Überdruck eingefüllt wird und Poren durch einen chemisch getränkten, aussen aufgebrachten Stoff nachgewiesen werden. Da dadurch der durch eine Pore während z. B. 24 h hindurchtretende Ammoniak integriert wird, ist dieses Verfahren ebenso empfindlich, wie die neuerdings auf dem Markt erhältlichen Leckdetektoren. Als Baustoffe kommen nur Eisen, Steatit und Quecksilber in Frage. Sie werden vor dem Zusammenbau peinlichst mechanisch gereinigt, dann entfettet bzw. entsalzt, teilweise entgast und alsdann der Heizformation unterzogen. In der nachfolgenden Stromformation werden die Elektroden und die Einbauteile zwecks Entgasung auf Temperaturen gebracht, die viele hundert Grade über der Betriebstemperatur liegen. Eingehende Versuche im Syndikat zeigten, dass derartig formierte Gefässe eine enorme Getterwirkung aufweisen. Sie ist derart gross, das selbst das bei einer Rückzündung durch den Brennfleck aus dem Graphit frei werdende Gas in kürzester Zeit absorbiert wird und der Betrieb sofort weitergehen kann. Damit diese Getterwirkung während Jahrzehnten wirksam bleibt, muss selbstverständlich das verwendete Eisenblech lunker- und porenfrei und an der Oberfläche innen blank sein. Nachdem der nach allen diesen Vorsichtsmassnahmen in der Studiengesellschaft gebaute erste wassergekühlte Prototyp in Betrieb genommen wurde, zeigte er einen enormen und regelmässig wiederholbaren Fremdgasanstieg im Innern. Durch über ein Jahr sich erstreckende Versuche konnte dessen Ursache als Diffusion des im Wasser vorhandenen atomaren Wasserstoffes durch die Eisenwandung ermittelt werden [2]. Als Konsequenz ergab sich zunächst die Verwendung wasserstoffionenfreier Flüssigkeiten, dann Luftkühlung, sowie die Verwendung bestimmter Metalle mit sehr stark reduziertem Wasserstoffdurchgang. Dazu gehören das später von der *General Electric* verwendete Chromeisen und die von *Siemens* auf den Eisenmantel weich aufgelöteten Kupferrohre mit viereckigem Querschnitt, wofür sich *Siemens* eine Lizenz vom «Syndikat» erwarb. Die Wasserstoffdurchlässigkeit geht parallel zur Korrosionsanfälligkeit. Die meisten bis heute in Europa hergestellten Stromrichtergefässe haben Luftkühlung zur Vermeidung der Wasserstoffdiffusion.

4. Entladungsphysik

Nachdem in der Studiengesellschaft von 1925...1932 drei den Anforderungen der Reinheit und der Vakuumtechnik entsprechende Prototypen gebaut worden waren [3], wurden systematische Lichtbogenuntersuchungen in Angriff genommen. Es gelang, die bei positiven Strömen auftretenden Überspannungen in «Reinkultur darzustellen». Danach lässt ein bestimmter Stromquerschnitt A bei einem bestimmten Gas- oder Dampfdruck p höchstens einen bestimmten Grenzstrom I_g passieren laut:

$$I_g = c\, A^m\, p^n$$

mit

$$m < 1$$

und

$$0{,}5 < n < 1{,}1$$

Die Leitfähigkeit ist also beim Vakuumbogen begrenzt, ähnlich wie bei einer Elektronenröhre, sie wächst jedoch mit steigendem Druck. Die Lichtbogenkennlinie zeigt beim Grenzstrom einen jähen, mit Oszillationen verbundenen Anstieg der Bogenspannung bis zu vielen tausend Volt [4]. Diese Überspannungen sind im Gleichrichterbau ebenso gefürchtet wie Rückzündungen, welche oft als deren Ursache und auch als deren Folge auftreten. Als Abhilfe ergab sich hoher Dampfdruck oder eine Edelgasfüllung. Damit dadurch die Spannungsfestigkeit gegenüber der Sperrspannung und die Entionisierungsdauer des Nachstromes nicht leiden, wurde die Anode in sehr geringem Abstand allseitig von einem Graphitgitter umgeben. Andererseits wurde dafür gesorgt, dass bald nach Inbetriebnahme des kalten Gefässes das Edelgas in den Dom gepumpt und dort gespeichert wird. Diese Edelgasfüllung, die von den Firmen *Sécheron* und *Pintsch* konsequent angewandt wurde, hat sich im Betrieb ausserordentlich bewährt. Sie wird laut der Veröffentlichung von *E. H. Ludwig* [5] neuerdings auch von anderen Firmen angewandt. In der Studiengesellschaft wurden 1933... 1935 eingehende Versuchsreihen mit den verschiedenen Edelgasen unter Benützung der Langmuirschen Sondentheorie durchgeführt. Sie führten bereits damals zur Erkenntnis, dass das Raumpotential vom Kathodenraum bis zur Anode nicht stetig wächst, sondern an den Querschnittsverengungen stufenweise ansteigt, wobei zwischen 2 aneinandergrenzenden Plasmen eine Doppelschicht auftritt, wie das *Max Schönhuber* in seiner 1958 erschienenen Dissertation [6] sehr schön dargestellt hat.

5. Industrielle Verwertung

Dank der Leitung und der Förderung durch Dr. *W. Dällenbach* und den guten Ideen auch des Autors war die Zusammenarbeit zwischen sämtlichen fünf an dem Teamwerk beteiligten *(Rudolf Seuber, Gustav Oesch* und *Josef Rusch)* recht erfreulich und entsprechend erfolgreich. Sie zeitigten die aus den vorstehenden Darlegungen hervorgehenden schönen Resultate.

Die Sécheronwerke in Genf beteiligten sich 1931 und die Firma Julius Pintsch Berlin 1934 an der Studiengesellschaft und übernahmen später die industrielle Verwertung. Sécheron stellte 1939 an der Landesausstellung in Zürich einen pumpenlosen Gleichrichter für 600 V und 200 A aus; er ist heute noch dicht und betriebsfähig. Während des 2. Weltkrieges wurde die Entwicklung mangels geeigneter Keramik und der zugehörigen Verschmelzungsmetalle stark gehemmt. Der Autor, der 1925...1936 in der Studiengesellschaft und später bei Sécheron tätig war, übernahm dann die Weiterentwicklung der Gefässe. Der Bau grosser Anoden mit einem oder zwei Steuergittern, sowie die Steigerung des Stromes pro Gefäss auf 2000 A Nennstrom und der Spannung bis auf 3000 V, stellten noch manches schwierige technische Problem, ebenso der Wechselrichterbetrieb sowie die Einanodengefässe mit ihrer Tendenz zum Abreissen der Erregung. Die übrigen Gleichrichterfirmen gingen allmählich ebenfalls zum Bau pumpenloser Gefässe über, nachdem die Studiengesellschaft deren «Existenzbeweis» erbracht, d. h. die Möglichkeit des Baues und der Vakuumhaltung sowie der Betriebssicherheit gezeigt hatte.

Zu den wichtigsten Anwendern pumpenloser Gefässe gehören die Bahnen. Für die Aluminiumelektrolyse sind in Afrika Anlagen für 100 000 A bei etwa 1000 V, also mit 100 000 kW, mit pumpenlosen, gittergesteuerten Gefässen in Betrieb. Besonders vorteilhaft erwiesen sich die gittergesteuerten pumpenlosen Stromrichter zum Antrieb regelbarer Motoren in Walzwerken. In seinem Kurzvortrag vom Jahre 1941 im Schweizerischen Elektrotechnischen Verein [7] erwähnte der Autor bereits die Möglichkeit der Anwendung gittergesteuerter pumpenloser Stromrichter auf Lokomotiven. Heute sind in Frankreich über 400 Gleichrichterlokomotiven in Betrieb. Die Sécheronwerke in Genf erhielten 1961 von den indischen Staatsbahnen den Auftrag zum Bau von 168 pumpenlosen Stromrichtern mit Edelgasfüllung für Lokomotiven für Gleich- und Wechselrichterbetrieb.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass der pumpenlose, edelgasgefüllte Quecksilberdampfstromrichter seine Feuerprobe in der Praxis bestanden hat und als ein äusserst robuster und betriebssicherer Apparat angesehen wird. Natürlich muss er wegen der vielen sich teilweise widersprechenden Anforderungen mit äusserster Sorgfalt konstruiert und gebaut werden. Aus verschiedenen, in letzter Zeit in der Literatur erschienenen Veröffentlichungen [5; 8] geht ferner hervor, dass die Erkenntnis heute Allgemeingut ist, wonach Verunreinigungen aller Art als schädliche Zündsubstanzen durch äusserste Reinlichkeit zu vermeiden sind. Diese Forderung ist auch in anderen Zweigen der Vakuum-Entladungstechnik ja längstens wohlbekannt, so beim Bau von Senderöhren zur Vermeidung der kathodenseitigen «Flash», beim Bau von Röntgenröhren sowie von Teilchenbeschleunigern und in der Plasmaphysik beim Bau von Apparaturen zur Kernfusion. Trotz der enormen bisher geleisteten Forschungsarbeiten im Stromrichterbau gibt es aber noch viele ungelöste Probleme, insbesondere in quantitativer Hinsicht.

Literatur

[1] *Dällenbach, W., E. Gerecke* und *E. Stoll:* Vorgänge an negativ geladenen Sonden und an Teilchen, die in Gasentladungen suspendiert sind. Phys. Z. 26(1925)1, S. 10...22.

[2] *Dällenbach, W.:* Grossgleichrichter ohne Vakuumpumpe. ETZ 55(1934)4, S. 85...89.

[3] *Dällenbach, W.* und *E. Gerecke:* Grossgleichrichter ohne Vakuumpumpe. ETZ 57(1936)33, S. 937...940.

[4] *Dällenbach, W.* und *E. Gerecke:* Entwicklungen und Fortschritte im Bau von Eisengleichrichtern. ETZ 61(1940)31, S. 705...709, 32, S. 734...738.

[5] *Ludwig, E. H.:* Entwicklungstendenzen und Probleme beim Bau von Quecksilberdampf-Stromrichtern. ETZ-A 81(1960)25, S. 903...913.

[6] *Schönhuber, M. J.:* Zur weiteren Klärung innerer Vorgänge in Quecksilberniederdruckgasentladungen, insbesondere über das Auftreten und Verhalten von Doppelschichten. Diss. Techn. Hochschule München 1957.

[7] *Gerecke, E.:* Quecksilberdampf-Mutatoren mit Stahlgefäss und Edelgasfüllung. Bull. SEV 33(1942)8, S. 226...228. Diskussion S. 228...230.

[8] *Schönhuber, M. J.:* Fortschrittliche Fertigungstechnik im Quecksilberdampf-Stromrichterbau. Brown Boveri Mitt. 48(1961)10, S. 572...585.

Adresse des Autors:

Prof. *Ed. Gerecke*, Institut für allgemeine Elektrotechnik an der ETH, Gloriastrasse 35, Zürich 6.