

Über die Entwicklung des Marxschen Lichtbogenstromrichters

Dieter Kind, Braunschweig

Inhalt

1. Einführung	1
2. Entladungsvorgänge in Luft und Experimente mit Lichtbögen.....	3
3. Experimente zur Optimierung von Lichtbogenkammern	5
4. Die Entwicklung von Lichtbogenstromrichtern.....	8
5. Lehrte – Misburg, die erste HGÜ-Versuchsanlage über 10 MW im Netz.....	12
6. Zusammenfassung und Rückschau	15
7. Literatur.....	18

1. Einführung

Konkrete Pläne zur Übertragung hoher elektrischer Leistungen über sehr große Entfernungen mit Gleichstrom gehen in Deutschland zurück auf die Jahre nach dem Ersten Weltkrieg. Obwohl damals schon gute Erfahrungen mit dem Betrieb von 220-kV-Drehstromübertragungen über große Entfernungen vorlagen, gab es Überlegungen, die technisch-physikalischen Grenzen bei langen Freileitungen und vor allem auch bei Kabeln durch die Anwendung von Hochspannungs-Gleichstromübertragung (HGÜ) zu vermeiden. Einer Verwirklichung solcher Pläne aber stand das Fehlen von Stromrichtern für hohe Spannungen und Ströme im Wege.

Angeregt durch die Diskussion über die Errichtung nationaler und europäischer Verbundnetze engagierten sich Ingenieure an Hochschulen und in der Industrie für die Entwicklung von HGÜ-tauglichen Stromrichtern. Zu ihnen gehörte auch *Prof. Erwin Marx*¹, der mit seinen Arbeiten an der Technischen Hochschule Braunschweig diese neue Technik insgesamt wesentlich vorantrieb. Er war 1925 mit 32 Jahren als ordentlicher Professor für Hochspannungstechnik an die Technische Hochschule Braunschweig berufen worden.

¹ Erwin Otto Marx (geb. 15.01.1893 in Mautitz bei Riesa, gest. 11.01.1980 in Braunschweig), Anm. d. Hrsg.

Für die damals noch junge Abteilung Elektrotechnik wurde ein Neubau errichtet, dessen Kernstück, das Hochspannungsinstitut, nach den Plänen von *Marx* in enger Zusammenarbeit mit dem Architekten *Prof. Carl Mühlenpfordt*² entstand (Bild 1).



Bild 1 Das Hochspannungsinstitut der Technischen Hochschule Braunschweig 1929,
Quelle: Autor

Das Institut galt viele Jahre als Vorbild für vergleichbare Neubauten in Deutschland und bewährte sich bald mit seiner vielseitigen Ausstattung bei vielen Forschungsarbeiten auf dem Gebiet von Hochspannung und Hochleistung [1]. Eine nach Umfang und wissenschaftlich-technischer Bedeutung besonders herausragende Arbeitsrichtung war die bis 1945 verfolgte Entwicklung des Lichtbogenstromrichters.

² Carl Mühlenpfordt (1878 – 1944), deutscher Architekt und Hochschullehrer an der TH Braunschweig, Anm. d. Hrsg.

2. Entladungsvorgänge in Luft und Experimente mit Lichtbögen

Ausgehend von den Erfahrungen, die *Marx* in der Industrie als Leiter eines Hochspannungsprüffelds gemacht hatte, galten die ersten Forschungsarbeiten der Durchschlagfestigkeit von Luft bei verschiedenen Elektrodenanordnungen und Spannungsformen [2]. Sie wurden mit Mitteln der Notgemeinschaft der Deutschen Wissenschaft, der Vorgängerin der DFG (Deutsche Forschungsgemeinschaft), ausgeführt.

Bei der Beobachtung unsymmetrischer Anordnungen in Luft zeigte sich im Gegensatz zu Anordnungen mit homogenen Feldern bei allen Spannungsformen überraschend ein ausgeprägter Polaritätseffekt der Durchschlagsspannung, für den er ein physikalisches Modell entwickelte. Von besonderem Interesse war die Untersuchung einer Spitze-Platte-Anordnung bei Wechselspannung: Die Durchschlagsspannung bei positiver Spitze war wesentlich niedriger als bei negativer Spitze (Bild 2). *Marx* erkannte, dass dieser Effekt für eine Gleichrichtung von sehr hohen Wechselspannungen genutzt werden könnte [3, S. 18].

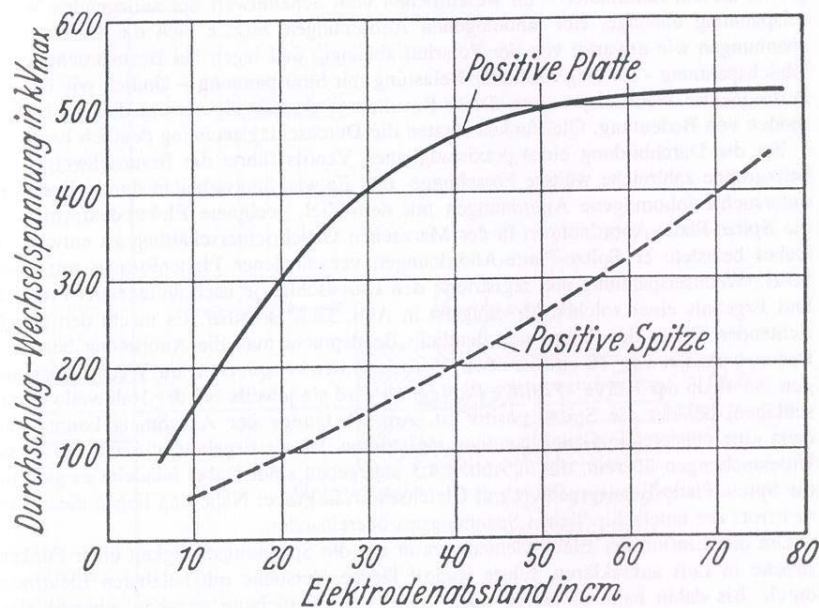


Bild 2 Durchschlagsspannung einer Spitze-Platte-Funkenstrecke bei 50 Hz. (nach *Herbert Buchwald*, Diss. 1930)³, Quelle: [3]

³ Buchwald, Herbert: Der Polaritätsunterschied der Luft – Durchschlagsspannungen in unhomogenen, unsymmetrischen elektrischen Feldern unter Berücksichtigung ihrer Verwendungsfähigkeit als Gleichrichter für sehr hohe Spannungen. Diss. TH Braunschweig, o.O. 1930, Anm. d. Hrsg.

Weitere neue Erkenntnisse erbrachten Untersuchungen des Durchschlagsverhaltens von Funkenstrecken bei Veränderung von Luftdruck und Elektrodentemperatur. Insbesondere auch bei strömender Luft, ergab sich bei unsymmetrischen Anordnungen ebenfalls ein deutlicher Polaritätseffekt (Bild 3) [3, S. 23]. Dieses Ergebnis wurde an der in Bild 4 wiedergegebenen Anordnung gewonnen, bei der die von der Spitze ausgehende Entladung von einer intensiven Luftströmung umgeben war [3, S. 84]. Diese Beobachtung dürfte den Anstoß zu der Idee gegeben haben, das überraschende Verhalten von stationären Entladungen unter dem Einfluss von Druckluftströmung im Hinblick auf eine Eignung für Lichtbogenstromrichter zu untersuchen.

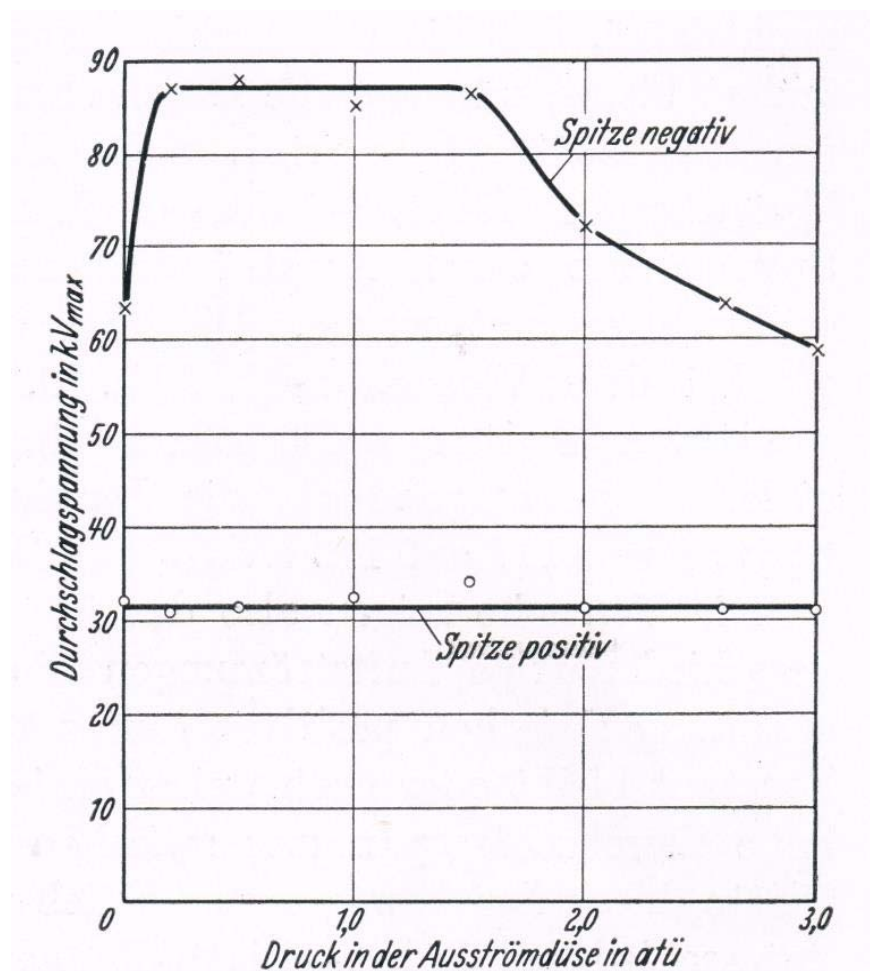


Bild 3 Durchschlagsspannung einer Spitze-Platte-Funkenstrecke mit Luftströmung nach Bild 4 bei 50 Hz (nach Wilhelm Ziegenbein, Diss. 1931⁴), Quelle: [3]

⁴ Ziegenbein, Wilhelm: Periodische Lichtbogenlöschung und Verhinderung der Rückzündung bei der Gleichrichtung hoher einphasiger Wechselspannungen durch unsymmetrische Funkenstrecken. Diss. TH Braunschweig, Heidelberg 1931, Anm. d. Hrsg.

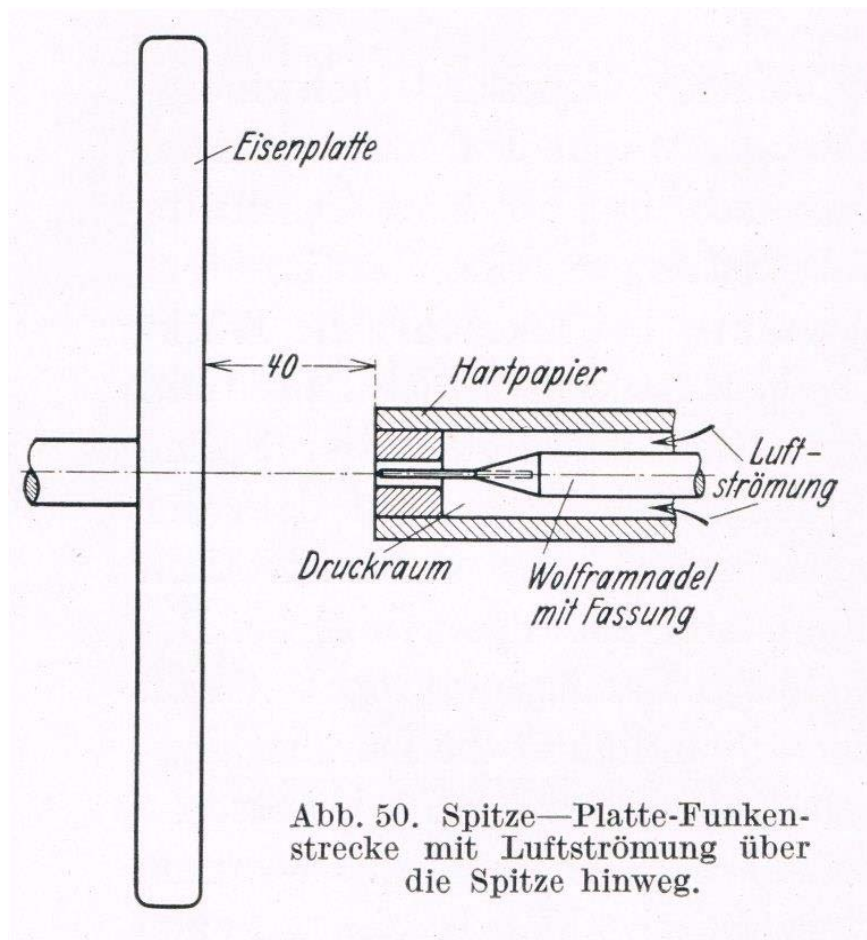


Bild 4 Spitze-Platte-Anordnung mit Luftströmung in Feldrichtung an der Spitze, Elektrodenabstand 40 mm, Quelle: [3]

3. Experimente zur Optimierung von Lichtbogenkammern

Die umfangreiche Liste von Veröffentlichungen aus dem Braunschweiger Hochspannungsinstitut zum Thema Lichtbogenstromrichter beginnt mit dem 1932 erschienenen Buch von *Prof. Marx* [3]. Dessen Aufbau ist insofern charakteristisch für die Arbeitsweise seines Verfassers, als zwar der Titel „Lichtbogen-Stromrichter für sehr hohe Spannungen und Leistungen“ das anspruchsvolle Entwicklungsziel vorweg nimmt, zunächst aber ausführlich die wissenschaftlichen Grundlagen darstellt. Dabei werden nicht nur die in wenigen Jahren unter seiner Leitung von Mitarbeitern erzielten Ergebnisse, sondern auch der Stand des Wissens über die Physik elektrischer Entladungen ausführlich beschrieben.

Bei Experimenten zur Untersuchung der elektrischen Festigkeit von Isolierungen bilden sich nach einem vollkommenen Durchschlag nur dann Lichtbogenentladungen aus, wenn die Spannungsquelle den für die Bildung eines Plasmakanals ausreichend hohen Strom liefert. In Starkstromnetzen ist daher beim Öffnen und Schließen von Schaltern sowie nach einem Durchschlag von Isolierungen immer mit Lichtbögen zu rechnen.

In HGÜ-Stromrichtern müssen Lichtbögen periodisch durch einen Spannungsimpuls gezündet und wieder gelöscht werden. Die Braunschweiger Forschungsarbeiten waren ganz auf die Aufgabe ausgerichtet, die Löschung von Lichtbögen durch eine starke Luftströmung zu erzwingen und anschließend eine rasche Wiederverfestigung der Strecke zu erreichen.

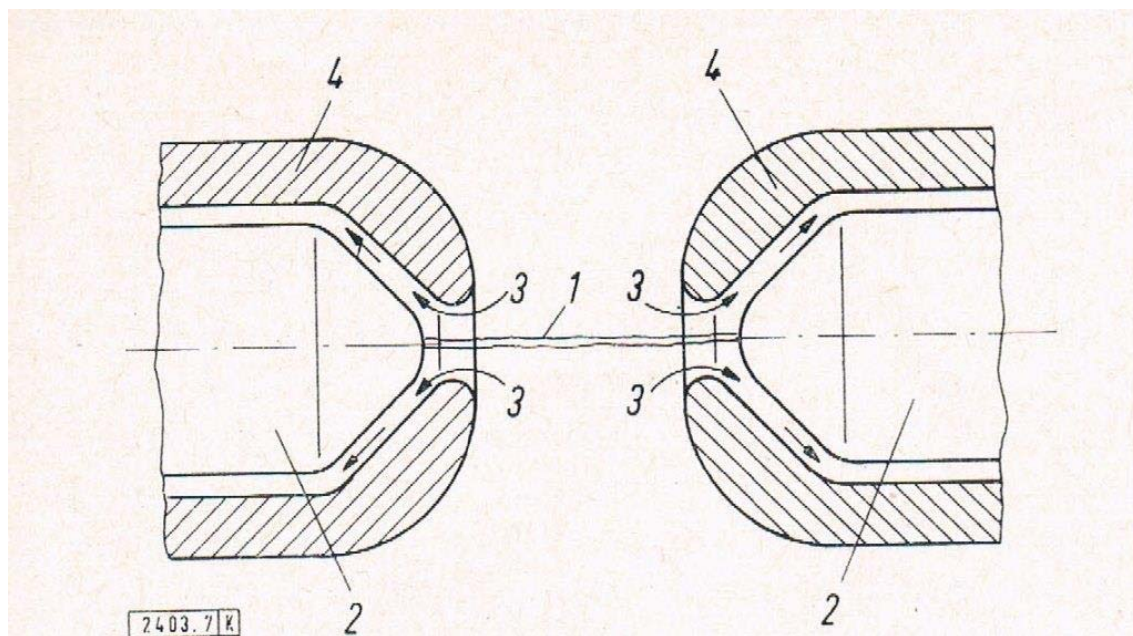


Bild 5 Haupt- und Schirmelektroden Prinzip des Lichtbogenstromrichters nach Marx. Legende im Text, Quelle: [1]

Das Prinzip der nach diesen Überlegungen entwickelten Hochdruck- Lichtbogenkammer mit Ausströmöffnungen an jeder Elektrode zeigt Bild 5: Der Lichtbogen 1 wird durch einen mittels Teslatransformator erzeugten Zündimpuls periodisch im Takt der Wechselspannung zwischen den Hauptelektroden eingeleitet. Er wird von einer schnellen Luftströmung 3 innerhalb der in den Hauptelektroden 2 eingelassenen Düsen umgeben, wodurch die Entladung räumlich stabilisiert wird. Aufgabe der Schirmelektroden 4 ist die optimale Führung der Gasströmung sowie die zur Verringerung des Abbrands der Hauptelektroden erforderliche elektrische Abschirmung der Lichtbogenfußpunkte. Trotz teilweise intensiver Kühlung bleibt die Lichtbogenspannung niedrig und ermöglicht eine periodische Löschung. Die Gleichrichtwirkung kommt dadurch zustande, dass der Lichtbogen nur in jeder zweiten Halbschwingung eingeleitet und wieder gelöscht wird [1].

Bild 6 ist eine Schnittzeichnung, Bild 7 ein Foto der Apparatur, mit der nach 1934 in einer Reihe von weiteren Arbeiten schrittweise eine Verbesserung der für Lichtbogenkammern erwünschten Eigenschaften erreicht wurde [4].

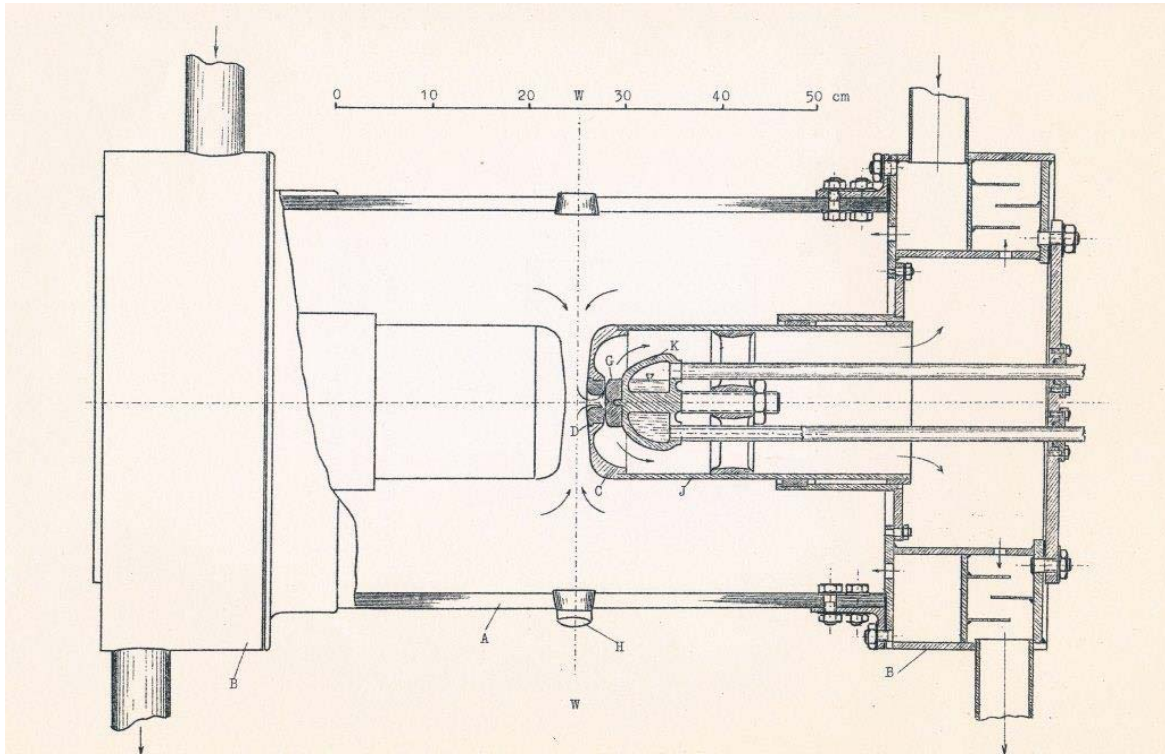


Bild 6 Schnittbild einer Lichtbogenkammer nach *Marx* mit düsenförmiger Auslaufströmung an den Hauptelektroden G. C, D = Schirmelektroden, K = Verdampfungskörper. Ausgelegt für 200 kV, 200 A, Quelle: [4]

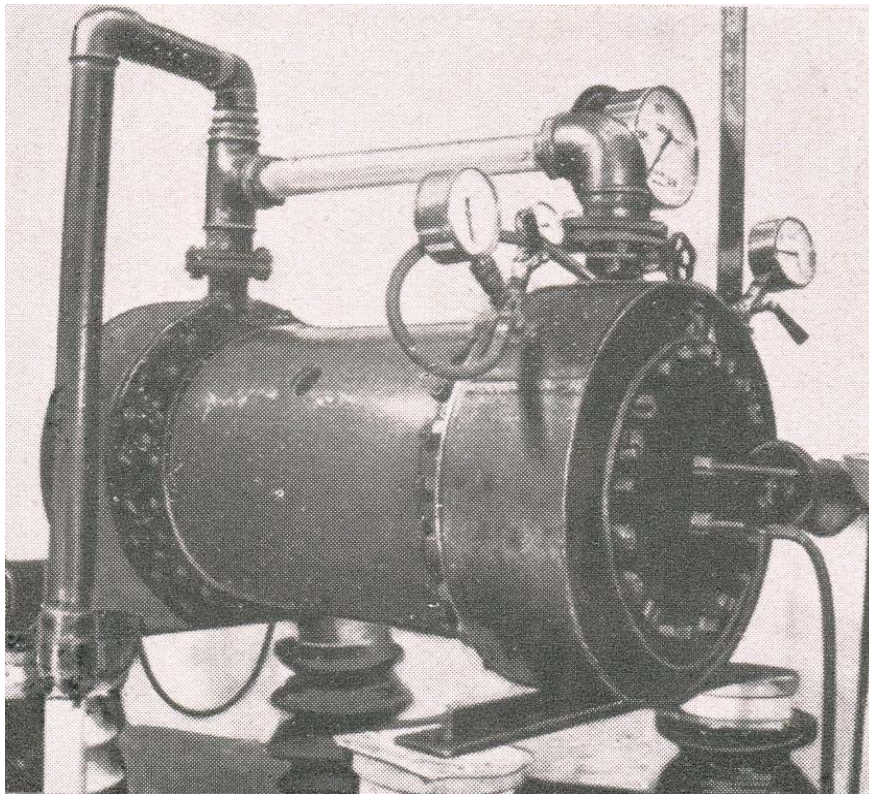


Bild 7 Foto der Versuchsanordnung mit Lichtbogenkammer nach Bild 6, Quelle: [4]

Das Untersuchungsziel war es, den Einfluss der Form von Schirm- und Hauptelektroden sowie der Luftströmung auf Lichtbogenverluste und Sperrfähigkeit der Strecke zu ermitteln.

Symmetrische Lichtbogenkammern dieser Art zeigten Ergebnisse, die die Zuversicht auf das Erreichen des Entwicklungsziels förderten. Ein wichtiges Ergebnis war unter anderem die Erkenntnis, „dass die Mittel zur Lichtbogenlöschung erst kurz vor dem Nulldurchgang des Stroms, der ja durch die Schaltung erzwungen wird, wirksam werden“ dürfen, um den Wirkungsgrad der Umformung nicht zu verschlechtern [3, S.106].

4. Die Entwicklung von Lichtbogenstromrichtern⁵

Ermutigt durch staatliches Interesse an Fortschritten bei der Übertragung elektrischer Energie über große Entfernungen begannen auch Unternehmen der Elektroindustrie sich mit der Entwicklung von HGÜ-tauglichen Stromrichtern zu befassen. Während die AEG sich zunächst an den Braunschweiger Arbeiten beteiligte, konzentrierten sich andere Firmen auf die Weiterentwicklung von Quecksilberdampf-Ventilen. Natürlich erkannte auch *Marx* trotz aller Überzeugung von seiner Idee, dass es konkurrierende Entwicklungslinien gab. So schrieb er bereits 1932: „Inwieweit die Lichtbogen-Ventile wegen ihrer Einfachheit, Widerstandsfähigkeit und wegen ihres geringen Gewichtes bei niedrigeren Spannungen die Quecksilberdampf-Gefäße ersetzen werden, muss die Zukunft zeigen“ [3, S. 155].

Die Weiterentwicklung der Lichtbogenstromrichter erforderte 1935 jedoch einen erheblich größeren finanziellen Aufwand, um in Leistungsprüfanlagen sowie in Probeübertragungen die Tauglichkeit zu bestätigen. Mit der Bewilligung der erforderlichen Mittel durch die DFG erreichte *Marx* die Erfüllung materieller Voraussetzungen für die weiteren Arbeiten. Neben der AEG und der DFG beteiligte sich auch das RLM (Reichsluftfahrtministerium) an der Finanzierung, um das Hochspannungsnetz im Zuge der „Wehrhaftmachung“ der Elektrizitätswirtschaft durch Verkabelung vor Luftangriffen zu schützen [5, S. 266, 311].

Eine neue Ersatzprüfschaltung mit zwei getrennten Stromquellen für den abzuschaltenden Strom und die wiederkehrende Spannung erfüllte die Voraussetzung für weitere Entwicklungen zu Stromrichtern mit höheren Leistungen [6]. Noch immer konnte jedoch das Kernproblem des Abbrands der Elektroden und damit des eingeschränkten Dauerbetriebs nicht überzeugend gelöst

⁵ Auf der Grundlage eines umfangreichen Quellenstudiums hat *Helmut Maier* in seiner 1993 als Monografie erschienenen Dissertation die durch viele Forschungsarbeiten und deren technische Umsetzung vollzogenen Entwicklungsschritte ausführlich beschrieben [5]. Darüber hinaus untersucht und bewertet er den durch die NS-Politik bestimmten politisch-ökonomischen Kontext.

werden. Diese Bedenken veranlassten offenbar den bisherigen Industriepartner AEG im Jahre 1937 die Entwicklung von Quecksilberdampf-Stromrichtern wieder aufzunehmen.⁶

Trotz umfangreicher Versuche zur Verbesserung zeigte sich jedoch, dass Lichtbogenkammern, die nur eine Trennstrecke besitzen, eine beschränkte Betriebsicherheit besitzen, denn auch bei mäßiger Beanspruchung waren gelegentliche Rückzündungen nicht zu vermeiden [7]. Hier brachte das in Bild 8 dargestellte Zwillingsventil mit zwei Teilstrecken sehr wesentliche Verbesserungen [8], [9], [10, S. 164].

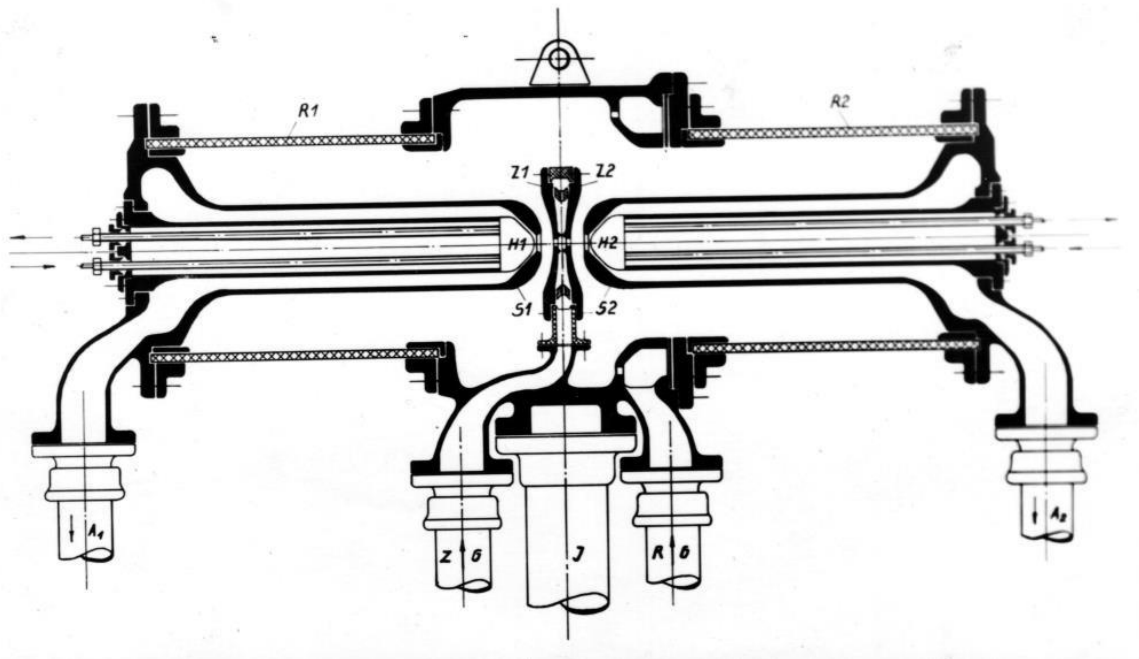


Bild 8 Lichtbogenkammer mit 2 Teilstrecken (Zwillingsventil). Legende im Text, Quelle: [8], [10], [11]

Durch die Anordnung von Zündelektroden Z, die zwischen den Hauptelektroden H angeordnet sind, entstand eine Reihenschaltung von zwei Teilstrecken. Zusammen mit den Schirmelektroden S ergaben sich gute Strömungsbedingungen für die Löschung des Hauptlichtbogens und die anschließende Wiederverfestigung der Strecke. Das für die Zündelektroden erforderliche Radialgas RG wurde über den die Kammer tragenden Isolator, der Hauptgasstrom A über die Endflansche parallel zu den Stromanschlüssen geleitet.

Die Aufteilung des Lichtbogens in zwei Teilstrecken erbrachte insbesondere bei der Rückzündungsfestigkeit eine erhebliche Verbesserung, die zu der Entscheidung führte, einen Lichtbogenstromrichter mit vier Teilstrecken zu entwickeln.

⁶ Immerhin bestanden weiterhin noch enge Kontakte mit der AEG, die durch Berichte über den Stand der Entwicklungsarbeiten und die Zulieferung von Bauteilen unterrichtet blieben.

Es war ein großer Erfolg für die Bemühungen um den Nachweis der praktischen Einsatzmöglichkeiten der Lichtbogenstromrichter als die HGW (Reichswerke Hermann Göring) auf ihrem Gelände bei Salzgitter-Watenstedt Versuche an der 100-kV-Sammelschiene genehmigten, wo die erforderlichen Energiemengen zur Verfügung standen [5, S. 182].

Um die Eigenschaften der Ventile und ihre Betriebssicherheit kennen zu lernen, wurden in den Jahren 1941 bis 1943 in der 110-kV-Versuchsanlage Watenstedt umfangreiche Versuche mit Leistungen bis 15 MW und 75 kV Gleichspannung durchgeführt und erfolgreich bewertet. Bild 9 zeigt die für höhere Anforderungen entwickelte Lichtbogenkammer mit vier Teilstrecken [7]. Dieser Aufbau bedeutete aber auch eine weitere Steigerung des Aufwandes für Konstruktion, Fertigung und Betrieb. Es zeigte sich, dass die Reihenschaltung zu einer deutlichen Erhöhung der Betriebssicherheit führte, da bei dem Ausfall einer Teilstrecke die Übertragung insgesamt störungsfrei weiter betrieben werden konnte. Das entwickelte Hochdruck-Lichtbogenventil erreichte die für eine HGÜ erforderliche zuverlässige Löschung zu einem genau bestimmbar definierten Zeitpunkt.

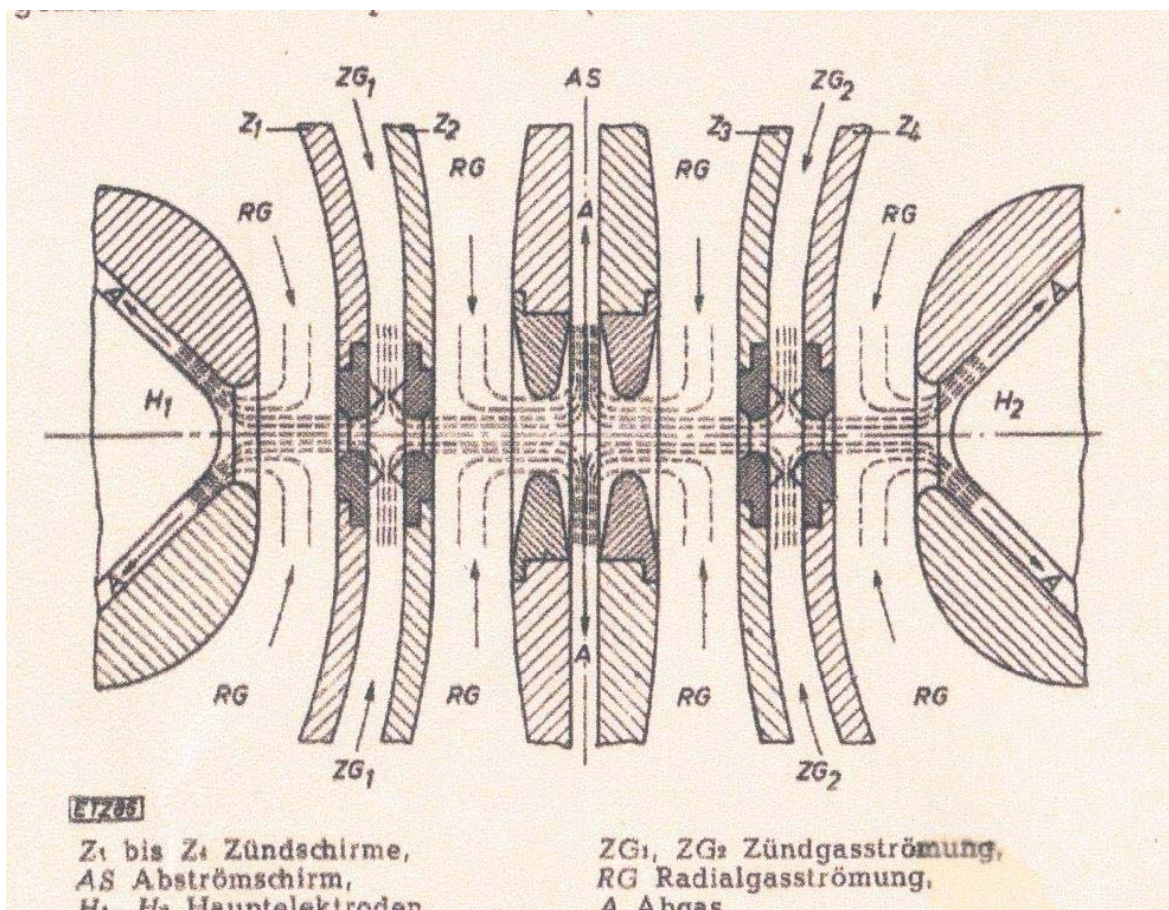


Bild 9 Lichtbogenkammer mit 4 Teilstrecken, ausgelegt für 400 kV, 600 A, Quelle: [7]

Wesentliche Nachteile gegenüber Quecksilberdampf-Ventilen blieben allerdings der schlechtere Wirkungsgrad und vor allem der die Betriebsdauer einschränkende Abbrand der Hauptelektroden.

Im Hinblick auf die „schon vielfach erörterte elektrische Kraftübertragung Norwegen – Deutschland“, hatte Marx bereits im August 1940 einen Antrag zur Bewilligung von Mitteln zur Errichtung einer leistungsstarken Großversuchsanlage unter Einbeziehung des 220-kV-Netzes der HGW gestellt [5, S. 199]. Auf der Grundlage der schließlich erreichten Verbesserungen bewilligte das RWA (Reichsamt für Wirtschaftsausbau) 1942 Mittel für die Entwicklung neuer Ventile, die für eine Dauerversuchsanlage mit Gleich- und Wechselrichterstationen im 220-kV-Netz vorgesehen waren (Bild 10). Auf dem Gelände, das neben der Umspannstation Hallendorf lag, wurden für die 220-kV-Versuchsanlage Hallendorf ein Stromrichter- und ein Gebläsehaus sowie ein Freiluftschaltfeld und die Vor- und Belastungswiderstände errichtet.

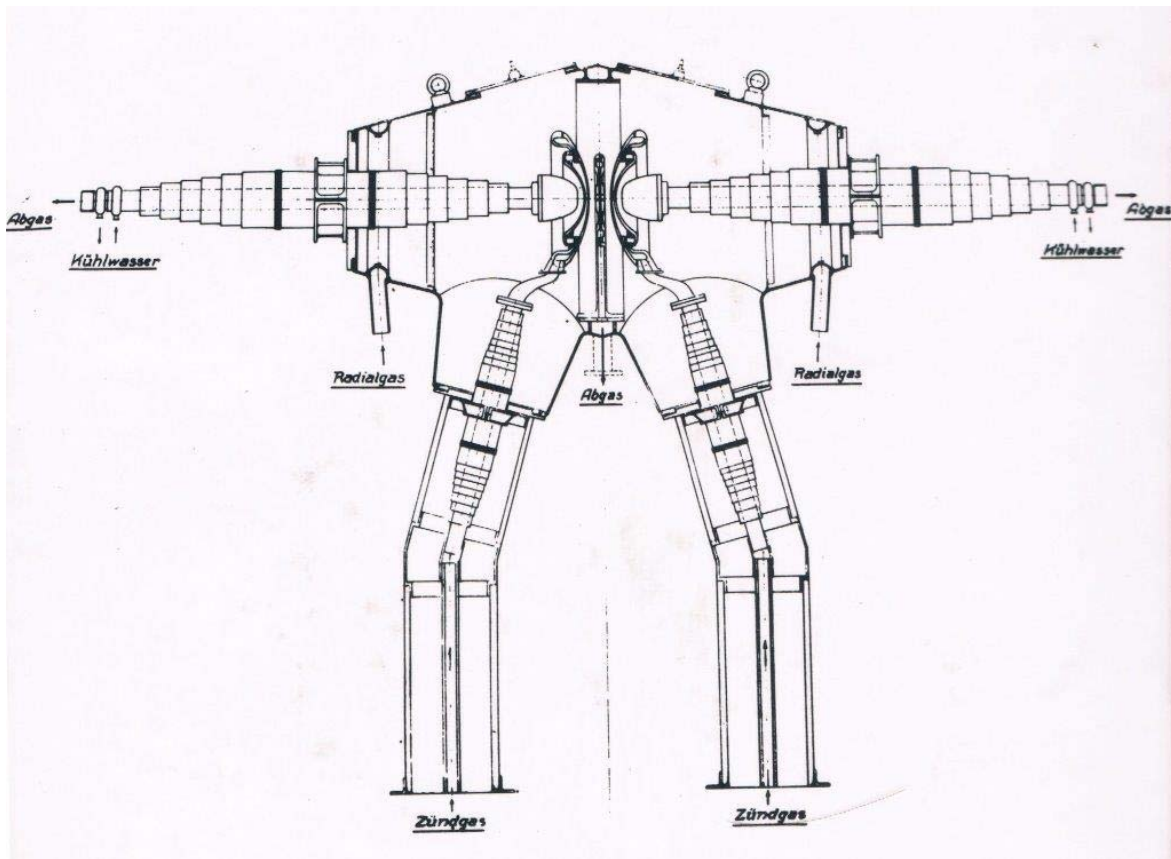


Bild 10 Schnittbild eines Lichtbogenstromrichters mit dem in Bild 9 gezeigten Hochdruckventil, Quelle: [12]

1943 musste das Projekt wegen des Mangels an Arbeitskräften jedoch auf die Aufstellung von Gleich- und Wechselrichtern in der Versuchsanlage Hallendorf mit je 3 Ventilen reduziert werden. Diese sollten über eine vorhandene 45 km lange 220-kV-Leitung von Hallendorf nach Lehrte im Kreisbetrieb mit 300 kV Gleichspannung betrieben werden [5, S. 201]. Obwohl die Anlage Hallendorf – Lehrte nahezu einschaltbereit war, hat sie ihre für Mai 1945 geplante Inbetriebnahme nicht erlebt und ist auch nach dem Ende des Zweiten Weltkriegs nicht mehr weiter verfolgt worden.

5. Lehrte – Misburg, die erste HGÜ-Versuchsanlage über 10 MW im Netz

Zuverlässige Stromrichter für hohe Spannungen und Übertragungsleistungen sind zwar eine notwendige aber keine hinreichende Voraussetzung für eine HGÜ. Zum Studium aller bei einer vollständigen Anlage auftretenden Teilprobleme hatte Marx bereits im Juli 1940 finanzielle Mittel für die Errichtung einer vollständigen HGÜ-Versuchsanlage in einem Mittelspannungsnetz beantragt.

Die PreussenElektra plante zu dieser Zeit die Verlegung eines zweiten 60-kV-Kabels parallel zu einem vorhandenen zwischen den östlich von Hannover gelegenen Umspannstationen Lehrte und Misburg. Es wurde vereinbart, dass dieses parallel liegende Kabel für die von Marx geplante Versuchsanlage verwendet werden sollte. Eine ausführliche Dokumentation über Aufbau und Betrieb der 60-kV-Versuchsanlage Lehrte – Misburg sowie über die in den Jahren 1942 bis 1944 durchgeführten Versuche und deren Ergebnisse enthält die Dissertation von Adil Erk, aus der viele der nachfolgenden Informationen gewonnen wurden [9], [11].

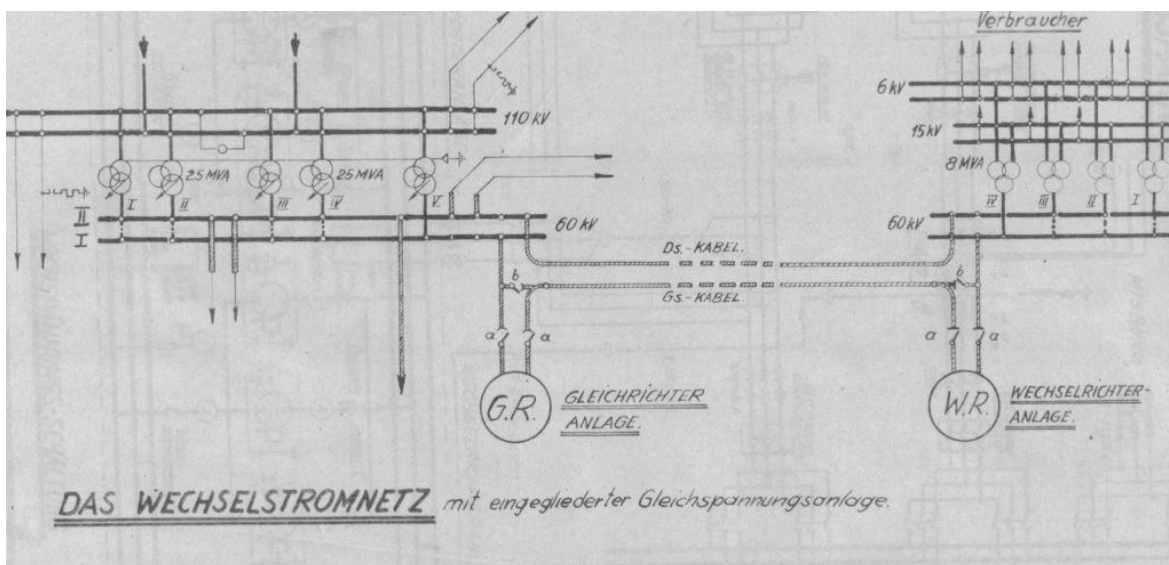


Bild 11 Schaltbild der HGÜ-Versuchsstrecke Lehrte – Misburg 1943, Quelle: [11]

Bild 11 zeigt das Schaltbild der 110/60-kV-Umspannwerke mit den beiden 5 km langen 60-kV-Kabelstrecken, von denen eines durch Zwischenschaltung von Stromrichtern als Gleichstromkabel mit 75 kV und etwa 12 MW Übertragungsleistung betrieben werden sollte. Die Gleich- und Wechselrichter sollten mit je sechs für 100 kV und 200 A Gleichstrom bemessenen Hochdruck-Lichtbogen-Ventilen aufgebaut werden (Bild 12) [11].

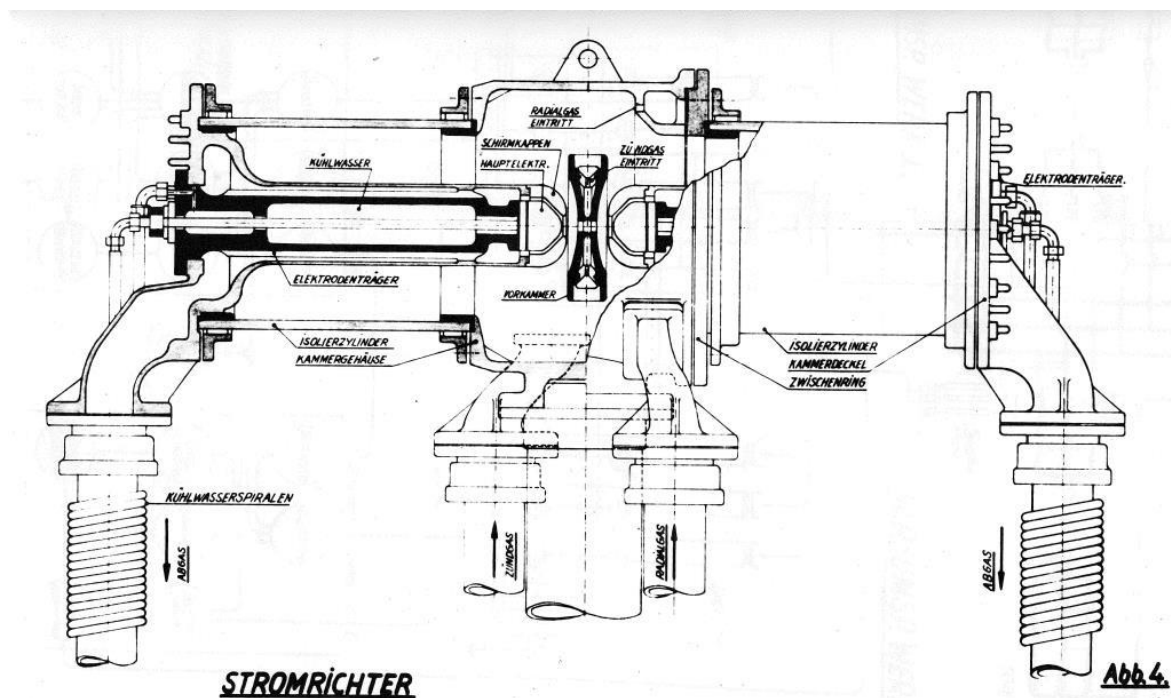


Bild 12 Schnittbild der Lichtbogenstromrichter der Versuchsanlage Lehrte-Misburg, Quelle: [11]

Zum Schutz gegen Rückwirkungen von Betriebsstörungen in den Stromrichtern auf die Stromversorgung im Drehstromnetz mussten zusätzliche Einrichtungen eingebaut werden, deren Bereitstellung wiederholte Verschiebungen der Inbetriebnahme zur Folge hatten. Bild 13 ist ein Foto eines der Ventile mit dem Zündtransformator, Bild 14 von einer der beiden Stromrichterhallen. Beide Stationen wurden einzeln sowie in der Gesamtübertragung eingehend untersucht. Sie arbeiteten einwandfrei mit der gewünschten Leistung und es ließen sich alle vorgesehenen Schalt- und Steuervorgänge ohne Schwierigkeiten durchführen [9].

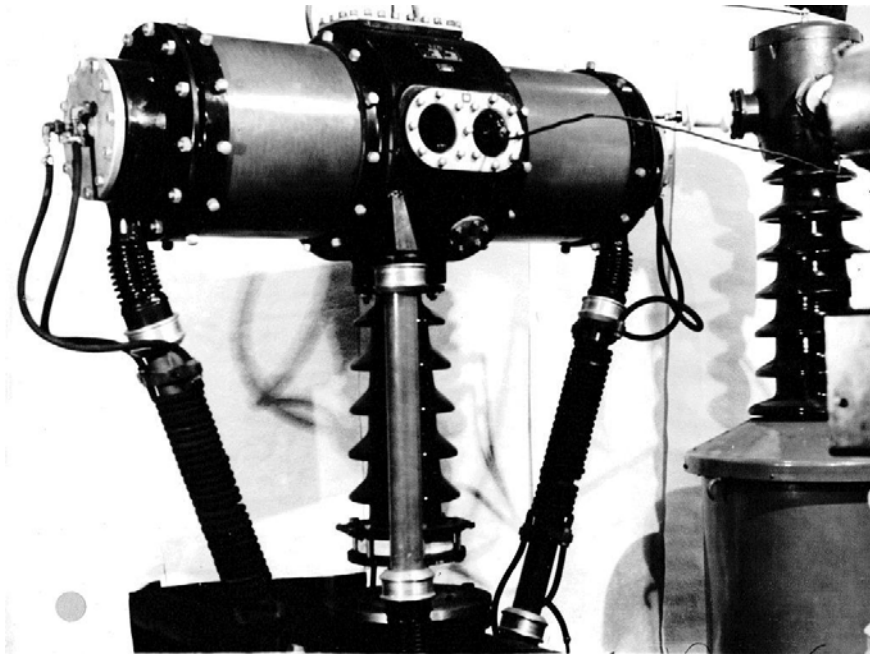


Bild 13 Lichtbogenstromrichter mit Zündtransformator für Versuche zur Betriebssicherheit, Quelle: [12]

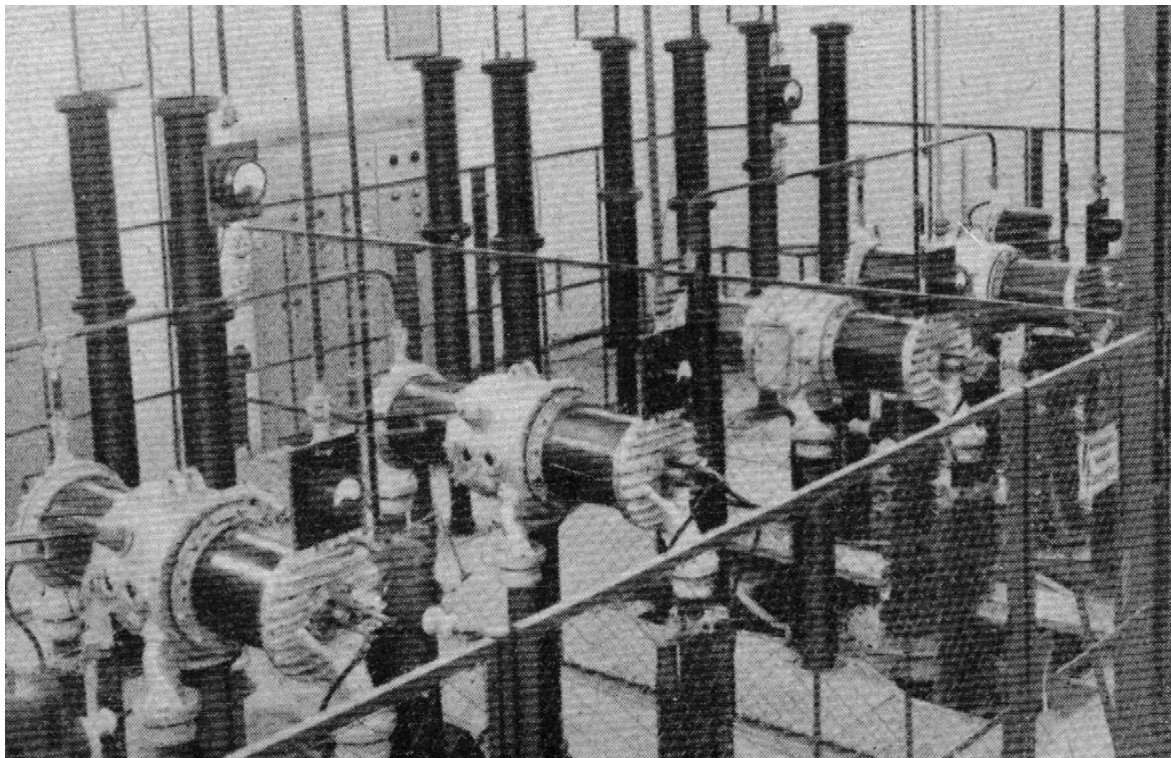


Bild 14 Ventilhalle der HGÜ-Versuchsanlage Lehrte-Misburg 1943, Quelle: [9], [10]

Obwohl dank der guten Zusammenarbeit mit der PreussenElektra die geplanten HGÜ-Versuche im MW-Bereich überhaupt erst möglich wurden, bedeutete die geforderte unbedingt zuverlässige Stromversorgung des Umspannwerks Misburg erhebliche Einschränkungen bei der Versuchsdurchführung. Das erkennt man auch an den Tageszeiten der von einer bis zu sechs Stunden durchgeführten Dauerversuche, die meist nachts stattfanden.

Bei den Versuchen im Dauerbetrieb traten gemäß dem Charakter der Anlage als Probetrieb zahlreiche neue Fragestellungen auf. Es wurde im Durchschnitt eine Leistung von 6 bis 7 MW, im Höchstfall 12 MW übertragen. Betriebsprobleme an den Ventilen selbst ließen sich durch Erhöhung des Druckes und der Zündgasgeschwindigkeit beseitigen.

Am 18. Juni 1944 wurde das Umspannwerk Misburg durch Bombentreffer schwer beschädigt, eine Wiederaufnahme des Versuchsbetriebs kam nicht infrage. Die nüchternen Worte, die *Erk* in seiner 1945 geschriebenen Dissertation für diese Situation fand, lassen die äußeren Umstände nur erahnen: „Der geplante längere ununterbrochene Dauerbetrieb konnte leider infolge von Kriegsereignissen nicht durchgeführt werden“ [11].

Obwohl der Betrieb der HGÜ-Versuchsanlage Lehrte – Misburg vor Abschluss der geplanten Dauerversuche abrupt abgebrochen werden musste, darf man zu Recht das ganze Vorhaben als einen Markstein der HGÜ-Technik ansehen. Die im Versuchsbetrieb erreichte Übertragungsleistung wurde erst 1950 von der Anlage Kashira – Moskau übertroffen, deren technische Einrichtungen einschließlich der Quecksilberdampf-Ventile aus der Demontage des deutschen Projekts Elbe – Berlin übernommen worden waren.

6. Zusammenfassung und Rückschau

Die Hochdruck-Lichtbogenstromrichter nach *Prof. Marx* haben sich in nur 15 Jahren aus Grundlagenuntersuchungen am Hochspannungsinstitut der TH-Braunschweig zu bemerkenswerten Hochleistungsgeräten entwickelt. Ihr physikalisches Wirkungsprinzip wurde auch für andere Anwendungen, insbesondere für Leistungsschalter, richtungweisend. Die auf Grund ihres Aufbaus erwartete Eignung zu hohen Übertragungsleistungen erneuerte jedenfalls in den 1930er Jahren das Interesse an Gleichstromübertragungen über große Entfernungen, darunter vor allem Planungen zur Verkabelung von Hochspannungsfreileitungen. Unter anderem wurde bereits damals die Nutzung Norwegischer Wasserkräfte zur Deckung des Strombedarfs von Deutschland diskutiert.

Während des Zweiten Weltkriegs wurde neben der Entwicklung der Marxschen Lichtbogenstromrichter auch die von der Industrie betriebene Entwicklung von Quecksilberdampf-Stromrichtern durch die Verantwortlichen im RLM und im RWA massiv gefördert. Dies geschah in der völlig irrationalen Annahme, die HGÜ-Technik könnte kurzfristig wegen der Möglichkeit einer Kabelverlegung von Freileitungen von militärischer Bedeutung

sein. Maßnahmen der Förderung waren nicht nur die Bewilligung hoher finanzieller Mittel, sondern auch die vorrangige Bereitstellung industrieller Produkte und nicht zuletzt die Befreiung hervorragender Ingenieure vom Wehrdienst.

Umfangreiche experimentelle Untersuchungen, die schrittweise zu Verbesserungen führten, kennzeichnen die Entwicklungen von *Prof. Marx* und seinen Mitarbeitern. Sie waren von intuitivem Verständnis der physikalischen Prozesse in Lichtbogenentladungen geleitet. Viele experimentelle Ergebnisse konnten nur durch professionelle Konstruktion and Herstellung der erforderlichen Versuchsobjekte erreicht werden.

Da sich jedoch für die zentralen technischen Probleme des Lichtbogenstromrichters, Elektrodenabbrand und Gesamtwirkungsgrad, keine Lösung abzeichnete, war schon 1941 die Entscheidung für die Versuchsanlage Elbe – Berlin zugunsten des Quecksilberdampf-Stromrichters gefallen. Dennoch erreichte *Marx* die Bewilligung von Mitteln zur Fortführung seiner Entwicklungen. Das Ende der *Marxschen* HGÜ-Forschungen und -Entwicklungen wurde also nicht aufgrund von Problemen des Prinzips der Lichtbogenventile eingeleitet, sondern durch den sich in der zweiten Jahreshälfte 1944 abzeichnenden politischen Zusammenbruch [5, S. 208].

Bei Kriegsende standen sowohl die *Marxschen* Lichtbogenstromrichter als auch die Quecksilberdampf-Stromrichter vor weiteren Versuchen, die jede der beiden Arbeitsgruppen für sich als aussichtsreich bewerteten. Während die Braunschweiger Arbeiten endgültig abgebrochen wurden, bestanden die von den Firmen AEG und Siemens für Elbe – Berlin entwickelten Stromrichter schließlich 1950 ihre Bewährungsprobe in der HGÜ Kashira – Moskau. Damit war die Konkurrenz zwischen beiden Ventillösungen eindeutig zugunsten der Quecksilberdampf-Ventile entschieden, bis diese etwa 30 Jahre später wiederum von der Thyristor-Technik abgelöst wurden.

Nach dem Kriegsende wurde die Braunschweiger Arbeitsgruppe in alle Winde zerstreut, die meisten der zum Teil sehr großen Versuchsgeräte wurden verschrottet. *Prof. Marx* setzte sich auch nach dem Krieg bis zu seiner Emeritierung im Jahre 1962 weiter für die Grundlagenforschung in der HGÜ-Technik ein. Dies kommt auch in der Ehrenurkunde zur Verleihung des VDE-Ehrenrings 1966 zum Ausdruck⁷.

Was blieb, war die Versuchsanlage Hallendorf, wo zuletzt die für 400 kV und 600 A ausgelegten Lichtbogenstromrichter montiert waren. Dieses weithin sichtbare Gebäude an der Autobahn A 39 südlich von Braunschweig (Bild 15) ist mit den charakteristischen kreisförmigen Wandöffnungen für Hochspannungsdurchführungen eine unübersehbare Erinnerung an das

⁷ Der VDE-Ehrenring wurde Prof. Marx „in Anerkennung seiner grundlegenden Arbeiten auf den Gebieten der Stromrichter- und Schaltertechnik und der Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung, die zu entscheidenden Fortschritten in der praktischen Anwendung geführt haben“ verliehen.

Wirken von *Prof. Erwin Marx*, einem bedeutenden Pionier der Hochspannungs-Gleichstromübertragung.



Bild 15 Versuchsanlage Hallendorf des Hochspannungsinstituts der TU-Braunschweig, Quelle: Autor 2007

Danksagung

Der Verfasser dankt *Prof. Dr.-Ing Jürgen Salge*, Braunschweig, sowie *Prof. Dr. rer.nat. Helmut Maier*, Bochum, für hilfreiche Anmerkungen zum Manuskript.

7. Literatur

- [1] Erk, Adil u. Kind, A.: Forschung und Entwicklung am Hochspannungsinstitut der Technischen Hochschule Braunschweig, ETZ-A 84 (1963), H. 4, S. 99-107
- [2] Marx, Erwin: Der elektrische Durchschlag von Luft im inhomogenen Felde. Arbeiten aus dem Hochspannungsinstitut der TH Braunschweig, Bd. I, 1931, S. 41-50
- [3] Marx, Erwin: Lichtbogen-Stromrichter für sehr hohe Spannungen und Leistungen. Berlin u.a.: Springer 1932
- [4] Meyer, Hans Wilhelm: Die Sperrspannung des Marxschen Lichtbogenstromrichters neuer Bauart. Diss. TH Braunschweig, Braunschweig: Hunold 1935
- [5] Maier, Helmut: Erwin Marx (1893-1980), Ingenieurwissenschaftler in Braunschweig, und die Forschung und Entwicklung auf dem Gebiet der elektrischen Energieübertragung auf weite Entfernungen zwischen 1918 und 1950. Stuttgart: GNT 1993
- [6] Marx, Erwin: Eine Ersatzschaltung für die Prüfung von Hochleistungsventilen und Hochleistungsschaltern. ETZ 57 (1936), S. 583-586
- [7] Tolazzi, Herbert: 15 MW-Drehstrom-Gleichrichteranlage für 75 kV Gleichspannung mit Hochdrucklichtbogenventilen. Diss. TH Braunschweig, o.O. 1946; s. auch ETZ 70 (1949), S. 334-337
- [8] Traupe, Willy-Hans: Lichtbogenlöschung mit strömendem Gas. Diss. TH Braunschweig, Berlin 1938
- [9] Erk, Adil: Versuchsanlage für die Gleichstrom-Hochspannungsübertragung von Hochdruck-Lichtbogenventilen nach Marx. Bull. SEV 38 (1947), Nr. 11, S. 295-308
- [10] Baudisch, Karl: Energieübertragung mit Gleichstrom hoher Spannung. Berlin u.a.: Springer 1950
- [11] Erk, Adil: Untersuchung einer Gleichstrom-Übertragungsanlage für 80 kV und 16.000 kW mit Hochdruck-Lichtbogenventilen. Diss. TH Braunschweig, o.O. 1946
- [12] Marx, Erwin: Bericht (an den Reichsforschungsrat) über den Stand der Entwicklungsarbeiten auf dem Gebiet der Gleichstromkraftübertragung. Braunschweig, 1.2.1941