Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke

Band: 56 (1965)

Heft: 13

Rubrik: Diskussionsversammlung des SEV über Gleichrichtertechnik vom 28. April 1965 in Zürich : Einführung

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: 10.07.2025

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

Die Bedeutung eines Defektes ist eine Ermessensfrage, die vom Besteller des Kabels zu beurteilen ist. Dieser wird sich beim Entscheid über den für den Blitzschutz zu treffenden Aufwand von der geforderten Betriebssicherheit und den bei einer Reparatur entstehenden Kosten leiten lassen. Lediglich als Richtlinie mag folgende Darstellung gelten, welche einige Fälle im Sinne abnehmender Bedeutung eines Defektes enthält:

a) Stollenkabel von Kraftwerken;
b) Steuer- und Fernmeldekabel von Kraftwerken;
c) Steuer- und Fernmeldekabel von Sendeanlagen und andere wichtige Nachrichtenkabel im Gebirge;
d) Bezirks- und Ortskabel im Gebirge;
e) Bezirks- und Ortskabel im Tiefland.

Literatur

[1] *W. C. Royal:* Modified Tape Armor and Lepeth Sheath Cable. Bell. Lab. Rec. 28(1950)6, S. 241...244.

[2] *D. W. Bodle:* Crushing of Buried Cable by "Cold" Lightning. Bell. Lab. Rec. 34(1956)3, S. 93...97.

[3] *H. Meister:* Blitzschutz und Telephonanlagen. Techn. Mitt. PTT 36(1958)1, S. 13...32.

[4] *E. Popp* und *E. Schulz:* Blitzfeste Nachrichtenkabel für Funktürme. Siemens Z. 37(1963)3, S. 166...170.

[5] *W. Wild:* Der Schutz selbsttragender Luftkabel gegen Beschädigung durch Blitzschlag. VDE-Berichte 10(1938)–, S. 177...179.

[6] *K. Berger:* Blitzsichere Schwachstromkabel. Bull. SEV 53(1962)3, S. 101...105.

[7] *E. D. Sunde:* Earth Conduction Effects in Transmission Systems. Van Nostrand New York 1949.

[8] *K. Berger:* Messungen und Resultate der Blitzforschung der Jahre 1947...1954 auf dem Monte San Salvatore. Bull. SEV 46(1955)5 und 9.

[9] *K. Berger* und *E. Vogelsanger:* Messungen und Resultate der Blitzforschung der Jahre 1955...1963 auf dem Monte San Salvatore. Bull. SEV 56(1965)1, S. 2...22.

Adressen der Autoren:

Prof. Dr. *K. Berger,* Versuchsleiter der Forschungskommission des SEV und VSE für Hochspannungsfragen, Seefeldstrasse 301, 8008 Zürich; *H. Meister,* Techn. Beamter, Abt. Forschung und Versuche der Generaldirektion der PTT, Speichergasse 6, 3000 Bern; *G. Martin,* S. A. des Câbleries et Tréfileries de Cossonay, 1303 Cossonay; *G. de Montmollin,* Société d'Exploitation des Câbles Electriques, 2016 Cortaillod; Dr. *G. Weissenberger,* Kabelwerke Brugg AG, 5200 Brugg.

Diskussionsversammlung des SEV über Gleichrichtertechnik

vom 28. April 1965 in Zürich

Einführung

Von *W. Lindecker,* Zürich

Der Einsatz der Halbleitergleichrichter hat innert weniger Jahre zu einer fast vollständigen Umstellung in der Gleichrichtertechnik geführt. Während eines halben Jahrhunderts war der Quecksilberdampfgleichrichter das Bauelement der Gleichrichteranlagen. Er wurde während dieser Zeit konstruktiv und wirtschaftlich zu höchster Perfektion entwickelt und hat sich in unzähligen Anlagen bewährt. Seiner Wirtschaftlichkeit war durch den Spannungsabfall zwischen Anode und Kathode eine physikalische Grenze gesetzt. Mit dem Kontaktgleichrichter hoffte man, einen Weg gefunden zu haben, um die Wirtschaftlichkeit von Gleichrichteranlagen erheblich zu verbessern. Trotz intensiver Entwicklungsarbeit und gutem technischen Erfolg konnte sich dieser jedoch nicht gegen den robusten und betriebssicheren Quecksilberdampfgleichrichter durchsetzen. Ein entscheidender Erfolg blieb ihm jedenfalls versagt.

Heute ist im Halbleitergleichrichter-Element ein neuer Baustein für Gleichrichteranlagen entstanden. Diese Elemente sind in bezug auf Wirtschaftlichkeit dem Kontaktgleichrichter mindestens ebenbürtig und als statische Anlagen wartungsmässig auch dem Quecksilberdampfgleichrichter überlegen. Es ist deshalb nicht erstaunlich, dass sich die Umstellung auf Halbleitergleichrichter innert kürzester Frist vollzogen hat. Die Entwicklung ist nicht abgeschlossen. Immerhin scheint der Zeitpunkt gekommen, mit der Diskussionstagung des SEV eine Standortbestimmung durchzuführen, einerseits, um den Konstrukteur über den heutigen Entwicklungsstand zu orientieren, und anderseits, um dem Betriebsmann eine Übersicht zu vermitteln, die ihm bei der Projektierung neuer Anlagen wertvoll sein wird. Wir mussten uns in der Auswahl der Themata Beschränkung auferlegen. Unsere Referenten werden hauptsächlich über die neue Halbleitertechnik sprechen. Es wurde aber gewünscht, dass ich als Vorsitzender mit wenigen Worten einen Rückblick auf die Quecksilberdampfgleichrichter-Technik gebe und damit das Bild der heutigen Situation vervollständige.

Ich komme diesem Wunsch gerne nach. Nachdem der Quecksilberdampfgleichrichter während eines halben Jahrhunderts seine wertvollen Dienste leistete und schweizerische Ingenieure und schweizerische Industriefirmen an seiner Entwicklung und an seiner Herstellung einen bedeutenden Anteil hatten, ist beim heutigen Anlass ein kurzer geschichtlicher Rückblick am Platze.

Im Jahre 1902 hat *Cooper Hewitt* beim Bau von Quarzlampen den Gleichrichter-Effekt entdeckt. In seinem aus diesem Jahr datierten Patent hat er den drei- und vierphasigen, aber bereits auch den einphasigen Gleichrichter beschrieben. Mit seiner Erfindung hat er der Elektrotechnik ein neues Gebiet erschlossen: die Gleichrichtung des Wechselstroms mit statischen Apparaten. Auf dem neuen Gebiet setzte vorerst in USA eine lebhafte Entwicklungstätigkeit ein. Sie erstreckte sich bereits auf alle Probleme, die bis in die neueste Zeit Anlass zu Entwicklungsarbeiten und Verbesserungen gaben:

a) Zündsysteme
b) Verhinderung der Rückzündungen
c) Vakuumfestigkeit, besonders für die Durchführungen
d) Einführung von Gittern zur Verhinderung von Rückzündungen und Verbesserung der Steuerung
e) Parallelschaltung und Serieschaltung von Lichtbögen usw.

Der ersten industriellen Verwertung mit Gleichrichtern in Glasgefässen folgte 1912 der Übergang auf Stahlgefässe durch *Schäfer* in Deutschland. Brown, Boveri ermöglichte *Schäfer* die Weiterführung seiner Entwicklungsarbeiten in der Schweiz. Das Unternehmen sicherte sich dadurch frühzeitig eine führende Stellung auf dem neuen Gebiet.

1914/15 wurde ein bemerkenswerter Fortschritt erzielt durch die Erfindung der Quecksilberdampfstrahl-Hochvakuumpumpe, gleichzeitig in USA durch *Langmuir* und in Europa durch *Gaede.*

Bei Brown Boveri beschäftigte sich ab 1921 eine unter der Leitung von *Dällenbach* stehende Entwicklungsgruppe mit den Problemen der Rückzündungen, des Vakuums und

der Werkstoffe, d. h. mit den Schwierigkeiten, die beim Betrieb von Quecksilberdampfgleichrichtern auftraten. *Gerecke,* unser heutiger Referent, gehörte ab 1922 dieser Studiengruppe an. 1925 gründete *Dällenbach* in Zürich eine Studiengesellschaft «Syndikat für Technische Physik», die mit Erfolg den *pumpenlosen* Quecksilberdampfgleichrichter entwickelte. 1931 beteiligte sich Sécheron, Genf, und 1934 *Pintsch,* Berlin, an der Studiengesellschaft. Sécheron stellte an der Landesausstellung 1939 einen sechsanodigen, pumpenlosen Quecksilberdampfgleichrichter für 200 A, 600 V, aus, der noch heute betriebsfähig ist.

Die Realisierung des pumpenlosen Gleichrichters stellte zweifelsohne einen ausserordentlichen technischen Erfolg dar; doch hatte er keinen revolutionierenden Einfluss auf die Gleichrichtertechnik. Pumpenlose Gleichrichter und Gleichrichter mit Vakuumpumpen haben sich nebeneinander bis in die jüngste Zeit hinein behauptet.

Die Erfindung des Ignitrons im Jahr 1932, bei welchem die Zündung des Lichtbogens über eine in das Quecksilber eintauchende Karborundumspitze durch einen Stromstoss erfolgt, gab der Weiterentwicklung des Einanodengleichrichters einen neuen Impuls. Das neue Zündungssystem erfüllte jedoch die Erwartung auf höhere Rückzündungsfestigkeit nicht, da die Rückzündungen in der Hauptsache durch die starke Restionisation in der Umgebung der Anode nach Erlöschen des Lichtbogens auftreten. Die gute Eignung des einanodigen Gleichrichters für hohe Stromstärken hatte aber als Resultat dieser Entwicklung weitern Bestand.

Ich möchte den geschichtlichen Rückblick abschliessen mit dem Hinweis auf den CIGRE-Bericht Nr. 116 der Session 1946 von *Storsand* und die Veröffentlichungen von *Gerecke* im Bulletin des SEV, 1962, Seite 293 ff., und von *Wasserrab* im gleichen Bulletin, Seite 297 ff., die dem Interessenten einen eingehenderen und interessanten geschichtlichen Rückblick und Einblick in die schwierigen Probleme vermitteln, die zu den verschiedenen Zeiten zu meistern waren.

Meine Ausführungen sollen sich aber nicht auf einen geschichtlichen Rückblick beschränken. Sie sollen auch auf die von Betriebsseite aufgeworfenen Fragen antworten: «Wo steht der Quecksilberdampfgleichrichter heute?», «Wo wird er heute und in Zukunft noch eingesetzt?».

Gleichrichter kommen in folgenden Anlagen zum Einsatz:

a) Elektrochemie und Elektrometallurgie
b) Gleichstromtraktion, ortsfest in den Unterstationen
c) Gleichstromtraktion, mobil auf Fahrzeugen
d) Gleichstrom-Antriebe
e) Spezielle Anwendungen, z. B. Stromversorgung für Beschleuniger in der Hochenergiephysik
f) Gleichstrom-Hochspannungsübertragung.

Auf dem Gebiet der *Elektrochemie und der Elektrometallurgie* ist die Frage des Einsatzes von Si-Gleichrichtern oder Quecksilberdampfgleichrichtern eindeutig zu beantworten. Der Si-Gleichrichter hat sich dank seines guten Wirkungsgrades, seines geringen Platzbedarfs und seiner Wartungsfreiheit durchgesetzt. Auch der Weiterausbau bestehender Quecksilberdampfgleichrichter-Anlagen wird vorteilhaft und ohne Schwierigkeiten mit Si-Gleichrichtern ausgeführt. Die Maschinenfabrik Oerlikon hat in Österreich eine Quecksilberdampf-Gleichrichteranlage von 30 000 A, 800 V, mit einer Si-Gleichrichteranlage auf 40 000 A erhöht, die ohne Störung parallel mit jener betrieben wird. Ein spezieller Schutz der Si-Gleichrichter durch Kurzschliesser ist nicht mehr notwendig.

Für viele ältere Anlagen dürfte eine Prüfung ergeben, dass die Kosten für den Umbau auf Si-Gleichrichter durch die resultierende Energieeinsparung kompensiert werden. Eine Regel lässt sich dafür nicht aufstellen, da Energiepreis und Wirtschaftlichkeit der bestehenden Anlage in die Rechnung eingehen. Quecksilberdampf-Gleichrichteranlagen mit Einanodenkesseln für höhere Spannungen werden dieser Wirtschaftlichkeitsprüfung länger standhalten als solche mit mehranodigen Kesseln für niedere Spannungen.

In den *Unterstationen zur Speisung von Bahnnetzen* hat der Si-Gleichrichter ebenfalls Eingang gefunden, und in absehbarer Zeit werden diese ausschliesslich mit Si-Gleichrichtern ausgeführt werden. Dank guter Kurzschlussfestigkeit und Überlastungsfähigkeit konnte sich der Quecksilberdampfgleichrichter jedoch noch immer behaupten. Die Maschinenfabrik Oerlikon hat für die Unterstationen der südafrikanischen Bahnen 52 Stationen von je 2 Gruppen für je 3000 kW (4500 kW für Zwei-Stunden-Betrieb) 3000 V mit Einanodenkesseln in Serieschaltung geliefert, und die Firma hofft, dass die gute Bewährung unter schweren atmosphärischen Störungen ihr noch weitere Aufträge einbringen wird, obschon neue Stationen bereits mit Si-Gleichrichtern ausgerüstet sind. Die AEG hat ungefähr die gleiche Anzahl Unterstationen erstellt. Ein Lizenznehmer der Maschinenfabrik Oerlikon hat 32 solcher Stationen für die chilenischen Bahnen geliefert.

In der Schweiz hat dagegen die Maschinenfabrik Oerlikon eine Si-Gleichrichteranlage 600 V, 1000 kW, für die Tramways Fribourgeois geliefert, die parallel zu den zwei Quecksilberdampfgleichrichtern gleicher Leistung läuft.

Auch für die *Installation in Lokomotiven* ist der Halbleitergleichrichter bestens geeignet. Neben der Wirtschaftlichkeit sind es der geringe Platzbedarf und die Wartungsfreiheit, die ihm diese Anwendung in Zukunft sichern werden.

Hier kann Sécheron einen grossen Erfolg aus jüngster Zeit ihres pumpenlosen Quecksilberdampfgleichrichters melden. Für die indischen Bahnen rüstet sie 112 Lokomotiven für schwere Gütertraktion mit je vier edelgasgefüllten, zweianodigen Gleichrichter-Gefässen für 1250 V aus, welche dank ihrer Edelgasfüllung auch im kalten Zustand betriebsbereit sind. Während der Talfahrt wird durch entsprechende Zündung in das Einphasennetz, 25 kV, 50 Hz, rekuperiert und dadurch der Gesamtwirkungsgrad verbessert. 40 der 112 Lokomotiven stehen bereits in Betrieb.

In den bisher aufgeführten Gebieten hat der Si-Gleichrichter den Quecksilberdampfgleichrichter bereits ersetzt, oder seine Ablösung ist in der nahen Zukunft mit Bestimmtheit zu erwarten. Bedeutend bessere Aussichten auf langfristigen Weiterbestand hat der Quecksilberdampfgleichrichter in den nachfolgenden Anwendungen:

In *geregelten Antrieben grosser Leistung* wird er heute und in Zukunft weiterhin seinen Einsatz finden. Seine Vorteile sind Überlastbarkeit und Unempfindlichkeit auch bei rauhesten Betriebsbedingungen, wie sie in Walzenstrassen und Förderanlagen auftreten. Die untere Grenze der Wirtschaftlichkeit gegenüber dem Si-Gleichrichter liegt im Leistungsbereich zwischen 100 und 1000 kW.

Brown Boveri hat die Gleichrichteranlage zum kontinuierlichen Warmwalzwerk der Sté. des Hauts Fourneaux

de la Chiers in Anzin (Frankreich), bestehend aus 28 pumpenlosen, sechsanodigen Quecksilberdampfgleichrichtern mit Luftkühlung zu je 1,25 kA geliefert.

Für die Speisung einer Breitband-Walzstrasse der Sté. Espérance Longdoz in Lüttich (Belgien) hat Sécheron eine Gleichrichteranlage von 40 000 kW bei 1000 V geliefert. Sie besteht aus 48 sechsanodigen, pumpenlosen Quecksilberdampfgleichrichtern mit Edelgasfüllung. Nach der Einführung des Walzgutes bei tiefer Geschwindigkeit werden die Motoren gleichzeitig auf die hohe Arbeitsgeschwindigkeit beschleunigt und nach dem Durchgang einzeln wieder auf die niedrige Geschwindigkeit abgebremst, wobei die Anlage als Wechselrichter arbeitet. Solche leistungsstarke Regelantriebe können vorläufig nicht mit Halbleitergleichrichtern realisiert werden.

Neuere Anwendungsgebiete, in welchen grössere, geregelte Gleichstromleistungen benötigt werden, bieten dem Quecksilberdampfgleichrichter interessante Einsatzmöglichkeiten. Als Beispiele meldet Brown, Boveri die Stromversorgungen der Beschleuniger der Hochenergiephysik, die Synchrotrons für Protonen in Genf (CERN), in Harwell (Nimrod) und für Elektronen in Hamburg (DESY). Für die Speisung der 7000 t schweren Führungsmagnete von Harwell werden 96 wassergekühlte Einanodengefässe benötigt. Die Erregung der Magnete erfolgt im Gleichrichterbetrieb, die Entregung durch Wechselrichterbetrieb. In den Spulen wird eine Energie von 40 MJ gespeichert.

Die Verwendung von Quecksilberdampf-Ventilen in Wechselrichtern und Umrichtern mit Leistungen von mehreren MW für die Speisung von Mittelfrequenzöfen bis ca. 1000 Hz ist ein weiteres Anwendungsgebiet, in welchem Brown Boveri tätig ist.

Weitere bedeutende Einsatzmöglichkeiten können dem Quecksilberdampfgleichrichter in den Anlagen zur direkten Erzeugung elektrischer Energie, z. B. in der Kernfusion und beim MHD-Verfahren, entstehen, dort wo die anfallende Gleichstromenergie in Wechselstromenergie umgewandelt werden muss. Die wirtschaftliche Energieerzeugung mit diesen Verfahren liegt noch in ferner Zukunft. Deshalb begnüge ich mich mit dieser Andeutung.

In die Phase der technischen und praktischen Realisation ist jedoch die *Gleichstrom-Hochspannungsübertragung* getreten. Sie wird vielleicht in naher Zukunft grosse Bedeutung in der Energiewirtschaft erlangen, da die Energietransportprobleme mit der raschen Zunahme des Energieverbrauchs immer mehr in den Vordergrund rücken. Neben der besseren Wirtschaftlichkeit bieten die Gleichstrom-Energieübertragungen den Vorteil einer asynchronen Verbindung.

Die schwedische Firma ASEA, die auf diesem Gebiet die führende Stellung einnimmt, hat in ihrer Zeitschrift 1963, Heft 2, über die von ihr zu diesem Zeitpunkt ausgeführten und in Ausführung stehenden Anlagen zusammenfassend berichtet. Es waren damals:

a) Übertragung nach der Insel Gotland, 20 MW, 100 kV
b) Ärmelkanalübertragung, 160 MW, 200 kV
c) Übertragung in Neuseeland, 600 MW, 500 kV
d) Übertragung nach Sardinien, 200 MW, 200 kV
e) Japanische 50/60-Hz-Frequenzumrichteranlage, 300 MW, 2 × 125 kV.

Kürzlich scheint in USA der Auftrag für eine 1000 MW Gleichstrom-Übertragung erteilt worden zu sein.

Solche Anlagen können gegenwärtig und auf weitere Zukunft hinaus nur mit Quecksilberdampfgleichrichtern realisiert werden, und es darf angenommen werden, dass er hier einen neuen, ganz bedeutenden Anwendungsbereich gefunden hat, der ihm weitere Existenz und Entwicklung sichert.

Adresse des Autors:
Dr. sc. techn. *W. Lindecker,* Direktor, Elektro-Watt AG, Postfach, 8022 Zürich.

Halbleiter-Leistungsdioden

Entwicklungsstand und Entwicklungstendenzen

Vortrag, gehalten an der Diskussionsversammlung des SEV vom 28. April 1965 in Zürich,
von *W. Deck,* Baden

621.382.2.026

Seit ungefähr 6 Jahren haben die Silizium-Leistungsdioden immer mehr an Bedeutung gewonnen. Es gibt eine ganze Anzahl verschiedener Fabrikate für 200 bis über 600 A pro Diode und zulässige Spitzensperrspannungen von 600...1200 V. Es sind für viele tausend MW Leistung Siliziumdioden hauptsächlich in Elektrolyseanlagen, Lokomotiven und Unterwerken in Betrieb. Die Erfahrungen sind sehr gut. Das Kernstück der Siliziumdiode besteht aus einer dünnen Scheibe aus hochreinem, einkristallinem Silizium, in der nach verschiedenen Methoden ein sog. PN-Übergang erzeugt wurde. Je nach Richtung der angelegten Spannung nimmt die elektrische Leitfähigkeit sehr hohe oder sehr kleine Werte an. An Hand der Kennlinien werden die Eigenschaften der Siliziumdioden besprochen.

Die Entwicklungstendenzen gehen in Richtung auf Dioden für grössere Ströme und höhere Spannungen. Ausserdem werden die stoßspannungsfesten Dioden, die sog. Controlled-Avalanche-Dioden grössere Bedeutung erlangen. Obschon es eine beträchtliche Anzahl verschiedener Halbleitermaterialien gibt, wird infolge technologischer Schwierigkeiten die Siliziumdiode auf längere Zeit die vorherrschende Leistungsdiode bleiben.

Depuis environ 6 ans, les diodes de puissance au silicium ont pris de plus en plus d'importance. Il en existe maintenant un grand nombre de modèles pour 200 à plus de 600 A par diode et pour des tensions maximales admissibles de blocage de 600 à 1200 V. Des diodes au silicium pour plusieurs milliers de MW sont en service, surtout dans des installations d'électrolyse, des locomotives et des sous-stations, où elles donnent pleine satisfaction. La partie essentielle de ces diodes est constituée par un mince disque de silicium monocristallin extra-pur, où l'on produit, selon diverses méthodes, une structure PN. Selon le sens de la tension appliquée, la conductivité électrique est très grande ou, au contraire, très faible. A l'aide des caractéristiques, l'auteur décrit les propriétés des diodes au silicium.

L'évolution dans ce domaine tend à la fabrication de diodes pour des courants encore plus grands et des tensions toujours plus élevées. Des diodes capables de supporter des chocs de tension (diodes à avalanche contrôlée) gagneront également en importance. Bien qu'il existe un grand nombre d'autres matériaux semi-conducteurs, la plupart donnent lieu à des difficultés d'ordre technologique, de sorte que les diodes de puissance au silicium maintiendront encore longtemps leur supériorité.

In den letzten 5—6 Jahren hat sich eine Wandlung in der Erzeugung von Gleichstrom vollzogen. Die vorher üblichen Quecksilberdampf-Gleichrichter und Kontaktumformer wurden auf vielen Gebieten durch die Halbleiter-Gleichrichter verdrängt. Diese Arbeit wird sich mit den Halbleiter-Leistungsdioden befassen, während die auch zu den Halbleitern ge-