Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke

Band: 27 (1936)

Heft: 24

Rubrik: Fortschritte und Neuerungen im Bau und in der Anwendung von Mutatoren : Bericht über den 14. Akademischen Diskussionsvortrag, vom 23. Mai 1936, in der Eidg. Techn. Hochschule, Zürich

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: 02.10.2025

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

SCHWEIZERISCHER ELEKTROTECHNISCHER VEREIN

BULLETIN

REDAKTION:
Generalsekretariat des Schweiz. Elektrotechn. Vereins und des Verbandes Schweiz. Elektrizitätswerke, Zürich 8, Seefeldstr. 301

VERLAG UND ADMINISTRATION:
A.-G. Fachschriften-Verlag & Buchdruckerei, Zürich 4
Stauffacherquai 36/40

Nachdruck von Text oder Figuren ist nur mit Zustimmung der Redaktion und nur mit Quellenangabe gestattet

XXVII. Jahrgang | N° 24 | Mittwoch, 25. November 1936

Fortschritte und Neuerungen im Bau und in der Anwendung von Mutatoren.

Bericht über den 14. Akademischen Diskussionsvortrag, vom 23. Mai 1936, in der Eidg. Techn. Hochschule, Zürich.

621.314.65

Der 14. Akademische Diskussionsvortrag, veranstaltet von der Elektrotechnischen Abteilung der Eidg. Techn. Hochschule, wurde am 23. Mai 1936 unter dem Vorsitz von Herrn Professor E. Dünner abgehalten. Herr Professor Dünner sammelte nachträglich die Referate und Diskussionsvoten, soweit sie erhältlich waren, und stellte sie uns freundlich zur folgenden Veröffentlichung zur Verfügung. Da kein Stenogramm aufgenommen werden konnte, war es nicht möglich, sämtliche Voten und Fragen, die gestellt und beantwortet wurden, hier wiederzugeben, obgleich sich darunter recht interessante Beiträge befanden. Das wesentlichste dürfte allerdings im folgenden Bericht enthalten sein.

Da das Comité Electrotechnique Suisse der Commission Electrotechnique Internationale vorgeschlagen hat, für gittergesteuerte Entladungsgefässe den Namen «Mutator» einzuführen, wird hier dieser Name gebraucht, ausgenommen die Beiträge der Herren Dr. Dällenbach und Dr. Siemens, weil diese beiden Autoren aus besonderen Gründen, die keine Kritik am Namen «Mutator» bedeuten, ausdrücklich Einspruch erhoben. (Red.)

La 14e journée académique de discussion, organisée par la division d'électrotechnique de l'Ecole Polytechnique Fédérale, a eu lieu le 23 mai 1936 sous la présidence de Monsieur le professeur E. Dünner. Monsieur le professeur Dünner rassembla après coup dans la mesure du possible les conférences et communications qu'il mit gracieusement à notre disposition pour les publier. Comme il ne fut pas possible de sténographier les discours, nous ne pouvons reproduire ici toutes les communications, questions posées et réponses, bien que parmi celles-ci il se trouvât des choses intéressantes. Cependant, l'essentiel est, nous semble-t-il, contenu dans le compte-rendu ci-dessous.

Le Comité Electrotechnique Suisse ayant proposé à la Commission Electrotechnique Internationale d'introduire le terme «mutateur» pour désigner les appareils à décharge à commande par grilles polarisées, nous avons utilisé ce terme sauf dans les communications de Messieurs Dällenbach et Siemens, qui s'y sont opposés pour des raisons spéciales, sans vouloir par là critiquer le terme «mutateur».

Referat

von

Herrn *C. Ehrensperger*, Ingenieur der A.-G. Brown, Boveri & Cie., Baden,

über

Die Entwicklung und Anwendung des Mutators.

Nach einem kurzen geschichtlichen Rückblick auf die Entwicklung de Mutators, wobei die Gittersteuerung besonders berücksichtigt wird, gibt der Autor eine Zusammenfassung der Anwendungsmöglichkeit dieses Apparates, dessen Ausgestaltung die schweizerische Industrie grundlegend gefördert hat. Besonders wird auf das Rekuperationsproblem bei Gleichstrombahnen, welche durch Mutatoren gespeist sind, eingegangen, ferner auf die Frage der Gleichstrom-Energieübertragung, die durch den Mutator grosser Leistung in den Bereich der praktischen Möglichkeit gerückt ist, und auf die elastische Kupplung von Wechselstrom-Netzen gleicher oder verschiedener Frequenz.

Après un bref aperçu historique du développement du mutateur, tenant particulièrement compte de la commande par grilles polarisées, l'auteur expose les différentes applications de cet appareil, dont une bonne part du développement revient à l'industrie suisse. Il s'arrête plus spécialement au problème de la récupération dans les chemins de fer à courant continu alimentés par des mutateurs, puis au problème du transport d'énergie en courant continu qui, par l'application de mutateurs à grande puissance, s'approche de la réalisation pratique, et finalement au problème du couplage élastique entre réseaux à courant alternatif de même ou de différente fréquence.

Als eigentlichen Erfinder des Mutators betrachtet man heute allgemein den Amerikaner Cooper-Hewitt, der schon um das Jahr 1902, als er sich mit Quecksilberdampflampen beschäftigte, den ersten Mutator erfand. Fig. 1 stellt einen Ausschnitt der ersten deutschen Patentschrift Cooper-Hewitts dar, wo links ein dreiphasiger und rechts ein vierphasiger Mutator aufgezeichnet ist. Man erkennt die flüssige Kathode, auf der mit Hilfe eines Zündbandes durch eine Hilfsspannung ein glühender Kathodenfleck erzeugt wird, von dem aus Elektronen emittiert werden, die von den Anoden mit positivem

Potential angezogen werden. Die Elektronen kollidieren auf ihrem Wege zur Anode mit Gasmolekülen und spalten diese in positive Ionen und weitere Elektronen. Durch die Ionen wird die negative Raumladung der Elektronen neutralisiert, und es erklärt sich dadurch, dass ein Stromübertritt durch

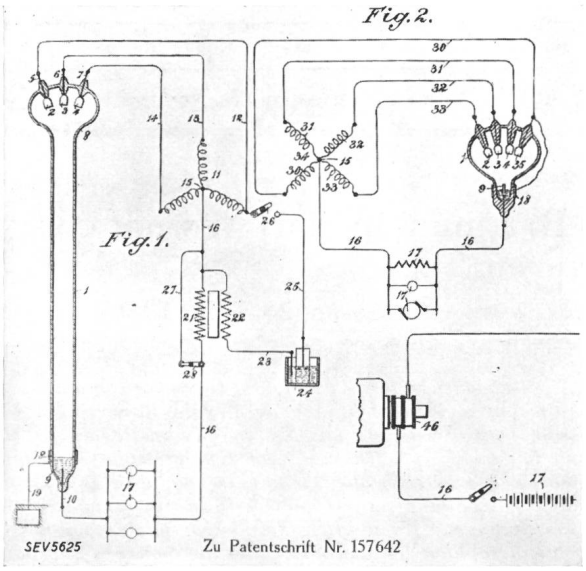

Fig. 1.
Auszug aus der deutschen Patentschrift 157 642 von Cooper-Hewitt aus dem Jahre 1902.

den Mutator mit sehr kleinem Spannungsabfall möglich wird. Den Zündvorgang erkennt man am leichtesten aus der Figur rechts, wo das Zündband 18 durch einen Draht kurzzeitig mit einer Phase des Transformators verbunden wird. Die in der gleichen Figur mit 9 bezeichnete, aus dem Kathodenquecksilber hervorragende Elektrode dient zur Fixierung des Kathodenflecks zwischen Quecksilber und dieser Elektrode.

Cooper-Hewitt hat nicht nur den Mutator erfunden, sondern er hat schon damals die Möglichkeit der Spannungsregulierung durch Einstellung der Zündpunktlage erkannt. Er verwendete zu diesem Zwecke mehrere einanodige Gefässe, die er periodisch mit Hilfe einer sinnreichen Kontakteinrichtung steuerte. Trotzdem Cooper-Hewitt sich dazumal bemüht hatte, seine Erfindungen praktisch zu verwerten, wurde seine Idee nach vielen Misserfolgen aufgegeben. Neben vielen praktischen Schwierigkeiten gelang damals namentlich die Beherrschung der Rückzündungen nicht.

Die Weiterentwicklung der Idee Cooper-Hewitts wurde um das Jahr 1910 in Europa aufgegriffen und die Firma Brown, Boveri war sicher die erste europäische Firma, die in richtiger Erkenntnis der praktischen Bedeutung des Mutators dessen Entwicklung und Anwendung mit Zähigkeit verfolgte und durchsetzte. Schon vor dem Kriege stellte sie in der Schweiz und in andern europäischen Ländern Mutatoranlagen auf, die zur Zufriedenheit des Bestellers noch heute im Betriebe stehen. Die allgemeine Anerkennung der Bedeutung des Mutators für die Elektrotechnik erfolgte bei fast allen übrigen Firmen viel später und in Amerika erst dann, als die schweizerische Industrie anfing, Mutatoranlagen für den amerikanischen Kontinent zu liefern. Die Entwicklung wurde dann von allen Seiten her beschleunigt, da man erkannte, dass der Mutator der allgemeine Umformer der Zukunft sein wird.

Die weitere Entwicklung geht auf zwei Wegen vor. Der erste ist die Schaffung von Mutatortypen möglichst grosser Einheitsleistung und der zweite der Ausbau der durch die Gittersteuerung gegebenen neuen Anwendungsmöglichkeiten. Vergleicht man z. B. Maschinen oder Transformatoren heutiger Bauart mit älteren Konstruktionen, so fällt vor allem die fortgesetzte Steigerung der Einheitsleistung auf. Für Mutatoren wird schon seit langem eine ähnliche Entwicklung angestrebt. Der grösste Vertreter dieser Art ist der in Fig. 2 abgebildete, im Jahre 1927 gebaute Mutator, der schon mit über 16 000 A in Betrieb war. Der unerwartet grosse Spannungsabfall dieses Typs zwingt den Konstrukteur noch heute, für sehr grosse Stromstärken mehrere Einheiten parallel zu schalten. Als Beispiel einer der ersten Anlagen dieser Art zeigt Fig. 3 einen Teil des Aluminiumwerkes Chippis, wo Mutatoren grosser Leistung aufgestellt sind. Die Anlage ist auch deshalb bemerkenswert, weil hier erstmalig mit Hilfe der noch zu beschreibenden Gittersteuerung der Strom unabhängig von den Spannungsschwankungen konstant gehalten wird.

Nach diesem kurzen geschichtlichen Ueberblick folgt eine kurze Uebersicht der durch die Einfüh-

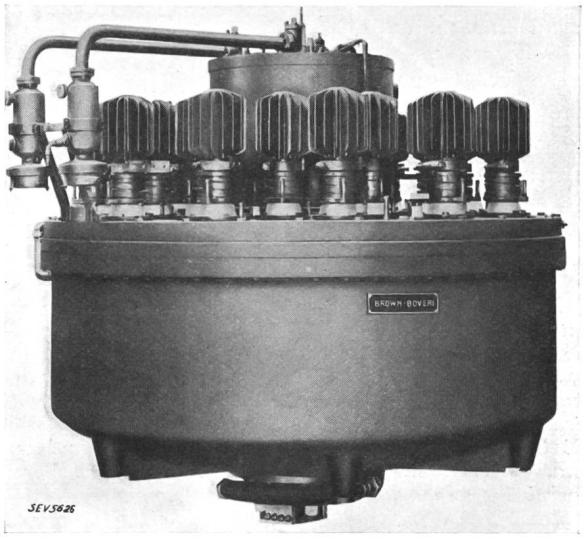

Fig. 2.
Mutatortyp A 1024 für hohe Ströme aus dem Jahre 1927.

rung der Gittersteuerung eröffneten Anwendungsmöglichkeiten des Mutators. Als Steuerung eines Mutators versteht man die Möglichkeit, den durch ihn fliessenden Strom mit ausserordentlich kleinen Energien beeinflussen zu können. Dabei sei aber von vornherein betont, dass der brennende Licht-

bogen selbst durch die heute praktisch angewandten Steuermittel nicht beeinflusst wird. Die Steuerung beschränkt sich lediglich darauf, den Moment, in dem der Lichtbogen einsetzt, nach Belieben einzustellen. Prinzipiell kann der Mutator auf vier verschiedene Arten gesteuert werden, wie aus Fig. 4 zu ersehen ist.

Die einfachste Art der Steuerung, die seinerzeit schon Cooper-Hewitt verwendet hat, ist die *Kathodensteuerung*. Mit Hilfe eines kleinen Zündtransformators wird zwischen Kathode und einer Elektrode aus geeignetem Material und geeigneter Form ein Lichtbogen gezündet, der einen Kathodenfleck erzeugt und die Zündung der Anode ermöglicht. Sobald die Anodenspannung negativ wird, erlischt der Anodenstrom und bei richtiger Einstellung der Zündvorrichtung verschwindet auch der Zündstrom. Es besteht also die Möglichkeit, die Neuzündung zu einem beliebigen Zeitpunkt unabhängig von der Phasenlage der Anodenspannung einzuleiten.

Bei den folgenden drei Steuermethoden wird zwischen einer Hilfselektrode und dem Kathodenquecksilber ein Erregerlichtbogen unterhalten, der einen bleibenden Kathodenfleck erzeugt. Man erreicht dadurch die dauernde Zündbereitschaft des Mutators.

Bei *Magnetsteuerung* wird zwischen Kathode und Anode ein magnetisches Sperrfeld erzeugt, das die von der Kathode gegen die Anode hinfliegenden Elektronen abdrängt und so eine Zündung der Anode verunmöglicht. Bei der Abschaltung des Magnetfeldes können die Elektronen ungehindert

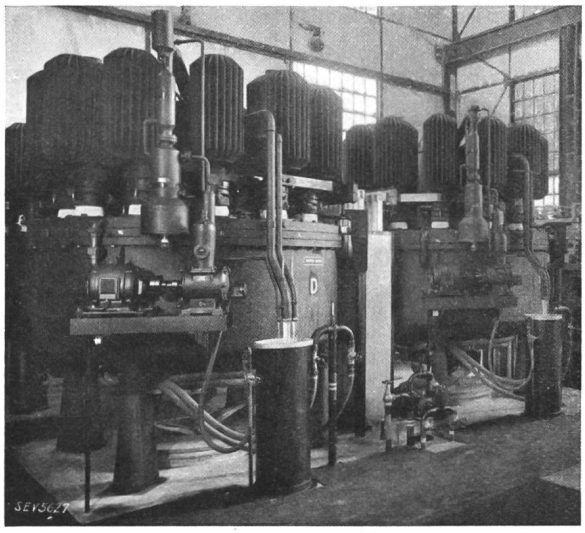

Fig. 3.
Mutatoranlage des Aluminiumwerkes Chippis für total 16 000 bis 18 000 A bei 450 V Gleichspannung, mit automatischer Regulierung des Stromes durch Gittersteuerung.

durch und der Lichtbogen zündet. Beim Erlöschen des Anodenstromes, wenn die Anodenspannung negativ und das Magnetfeld wieder eingeschaltet wird, kann die Wiederzündung der Anode beliebig verzögert werden. Auf Grund dieser Steuerung wurden schon im Jahre 1913 wichtige Erfindungen von Brown, Boveri zum Patent angemeldet, in denen bereits die Umwandlung von Gleichstrom in Wechselstrom und die Frequenzumformung mit Hilfe von Mutatoren der Fachwelt bekanntgegeben wurden.

Das Prinzip der *Gittersteuerung* beruht auf der Tatsache, dass ein der Anode vorgelagertes Gitter den Durchgang des Anodenstromes sperrt, wenn dieses Gitter gegenüber der Kathode negativ aufgeladen ist.

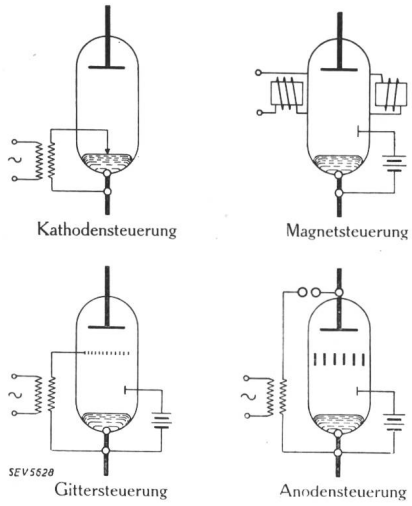

Fig. 4.
Schematische Darstellung der 4 prinzipiellen Steuermöglichkeiten eines Mutators.

Der Anodenstrom kann erst dann fliessen, wenn das statische Sperrfeld des negativ geladenen Gitters beseitigt wird, indem man dem Gitter eine positive Ladung aufdrückt. Auch hier kann dieser Zündmoment in bezug auf die Phasenlage des Anodenstromes nach Belieben gewählt werden.

Bei der *Anodensteuerung* wird ein dauerndes Sperrfeld durch besondere Formgebung des Mutators geschaffen, indem man z. B. den Lichtbogenweg einschnürt oder Schikanen in Form von stark sperrenden Gittern einbaut. Um die Zündung der Anode einzuleiten, wird mit Hilfe eines Stosstransformators, z. B. über eine Funkenstrecke, der Anode eine positive Spannungsspitze aufgedrückt, die ein Durchzünden bewirkt. Bei negativer Anodenspannung erlischt der Strom und die natürliche Sperrfähigkeit des Mutators wird wieder wirksam.

Diese vier Steuermöglichkeiten wurden schon alle praktisch mit Erfolg ausprobiert; es zeigte sich, dass sie vom steuertechnischen Standpunkt aus gleichwertig sind. Für Mutatoren grosser Leistung wird aber heute durchweg die Gittersteuerung vorgezogen.

Die erste Mutatoranlage mit grosser Leistung und gesteuerten Gittern wurde von Brown, Boveri im Jahre 1927 aufgestellt. Mit Hilfe der Gittersteuerung wurden dort schon Kurzschlüsse und Rückzündungen ausserordentlich rasch gelöscht. Die Wirkungsweise dieses Rückzündungsschutzes und Kurzschlußschutzes beruht darauf, dass mit Hilfe eines besondern Relais bei Eintreten einer Störung alle Gitter des Mutators automatisch negativ aufgeladen

werden [1]). Dadurch wird ein Wiederzünden irgendeiner Anode unmöglich und jede noch brennende Anode erlischt, sobald ihr Strom durch Null gegangen ist, was spätestens nach einer halben Periode erreicht wird.

Mit Hilfe der Gittersteuerung kann die Gleichspannung eines Mutators in bekannter Weise von ihrem vollen Wert bis auf Null herunter reguliert werden. Man spricht von der gezündeten Spannung des Mutators in Analogie zur induzierten Spannung einer Maschine und versteht darunter diejenige Spannung, die der Mutator infolge seiner bestimmten Zündpunktlage unter Ausschluss der Spannungsabfälle abgeben würde. Wird der Mutator z. B. auf eine Gleichstrommaschine belastet, so wird die Stärke des vom Mutator an die Maschine abgegebenen Gleichstromes von den Spannungsabfällen im Gleichstromkreis und von der Differenz der gezündeten Spannung des Mutators und der induzierten Spannung der Maschine abhängen [2]). Es ist dann möglich, bei konstantem Strom verschiedene Gleichspannungen einzustellen. Dieser Regulierversuch kann so fortgesetzt werden, dass man die Spannung des Mutators nicht nur bis auf Null herunter, sondern bis zur entgegengesetzten Polarität wieder heraufreguliert. Wenn bei gleichbleibender Stromlieferung die Spannung an Mutator und Maschine ihr Vorzeichen wechselt, so entspricht der neue Betriebszustand negativer Energielieferung des Mutators und man nennt das den Gleichstrom-Wechselstrom-Betrieb.

Dieser Uebergang vom Wechselstrom-Gleichstrom- zum Gleichstrom-Wechselstrom-Betrieb wurde während des Vortrages an Hand von Diagrammen und mehreren Oszillogrammen eingehend erläutert und es wurde gezeigt, dass die Welligkeit des Wechselstromes bei diesem Reguliervorgang praktisch unverändert bleibt und dass die Welligkeit der Gleichspannung durch Resonanzkreise beliebig vermindert werden kann. An Hand von einigen Kurven und Diagrammen wurde der Kommutierungsvorgang des Mutators erläutert; es betrifft dies die Vorgänge, die sich beim Uebergang des Stromes von einer Anode auf die nächstfolgende abspielen.

Die Beanspruchung des Mutators ist in den verschiedenen Betriebsfällen ganz verschieden [3]). So muss die Anode gegenüber der Kathode beim Wechselstrom-Gleichstrom-Betrieb in der Sperrperiode eine negative Spannung aushalten können, die gleich der doppelten Gleichspannung ist. Anderseits muss beim Gleichstrom-Wechselstrom-Betrieb das Gitter imstande sein, die Zündung einer Anode zu verhindern, wenn ihre positive Spannung gegenüber der Kathode gleich der doppelten Gleichspannung ist. Bei stark regulierter Gleichspannung treten beide Sperrbedingungen gleichzeitig auf und es besteht eine besonders starke Beanspruchung des Mutators, weil die Spannung zwischen Anode und Kathode sprunghaften Aenderungen unterworfen ist.

[1]) S. Widmer, Zweite Weltkraftkonferenz 1930, Bericht Nr. 221.
A. Leuthold, Brown-Boveri-Mitt., Dez. 1934, S. 318.
[2]) Ch. Ehrensperger, Rev. Gén. Electr., 8. Okt. 1932, S. 469.
[3]) Ch. Ehrensperger, Conférence Internationale des Grands Réseaux Electriques à haute tension, 1933, Bericht Nr. 14.

Ein wichtiges Anwendungsgebiet des Mutators ist die Speisung von Gleichstrom-Bahnnetzen, und es ist gelungen, mit Hilfe des Gleichstrom-Wechselstrom-Mutators den Rekuperationsstrom der Lokomotiven aufzunehmen. Es gibt verschiedene Möglichkeiten, dieses Rekuperationsproblem zu lösen, wovon drei in Fig. 5 dargestellt sind. Bei der Lösung A werden ein Wechselstrom-Gleichstrom- und ein Gleichstrom-Wechselstrom-Mutator parallel am gleichen Transformator angeschlossen. Der Wechselstrom-Gleichstrom-Mutator übernimmt den positiven Teil des Leistungsdiagrammes und der Gleichstrom-Wechselstrom-Mutator den negativen Teil. Man kann dann vom Fahrbetrieb auf Rekuperationsbetrieb übergehen, ähnlich wie dies bei rotierenden Maschinen möglich ist. Der Nachteil dieser Schaltung ist die Verwendung von zwei Mutatoren, wovon der eine meistens schlecht ausgenützt ist. Bei der idealen Lösung C wird mit Hilfe eines einzigen

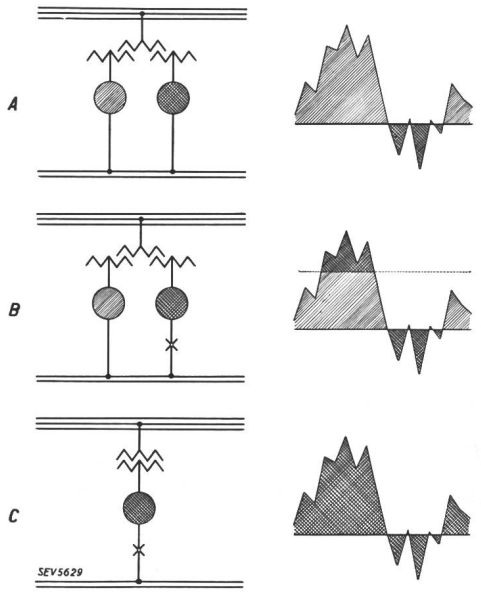

Fig. 5.

Die 3 Grundschaltungen zur Speisung eines Gleichstrom-Bahnnetzes mit Rekuperationsbetrieb.

A Wechselstrom-Gleichstrom- und Gleichstrom-Wechselstrom-Mutator arbeiten dauernd parallel.

B Umschaltbarer Mutator im Parallelbetrieb mit Wechselstrom-Gleichstrom-Mutator. Der umschaltbare Mutator übernimmt die Rekuperationsleistung und die Ueberlast im Wechselstrom-Gleichstrom-Betrieb.

C Umschaltbarer Mutator, der die gesamte Energiezufuhr und Rekuperationsleistung des Gleichstromnetzes übernimmt.

Mutators das ganze Leistungsdiagramm gedeckt. Dieser Mutator muss umschaltbar sein, denn die Polarität des Mutators ist bekanntlich im Gleichstrom-Wechselstrom-Betrieb entgegengesetzt derjenigen beim Wechselstrom-Gleichstrom-Betrieb. Die praktische Anwendung dieser Schaltung ist nicht so einfach, wie dies auf den ersten Blick scheinen möchte, da die Umschaltung ausserordentlich rasch und häufig vorzunehmen ist. Eine weitere Schwierigkeit besteht darin, dass die Spannung des Gleichstromnetzes im Gleichstrom-Wechselstrom-Betrieb nicht eindeutig fest ist, sondern nur von der rekuperierenden Loko-

motive bestimmt wird. Eine Lösung, die die Nachteile von A und C vermeidet und ihre Vorteile bis zu einem gewissen Grade verbindet, ist in B dargestellt. Das Merkmal dieser Lösung erkennt man aus dem Leistungsdiagramm, wo die Umschaltung nicht beim Energieübergang durch Null, sondern bei der gestrichelt eingezeichneten Umschaltgeraden stattfindet. Es werden ein Wechselstrom-Gleichstrom- und ein umschaltbarer Mutator parallelgeschaltet. Der umschaltbare Mutator nimmt die Leistung ober-

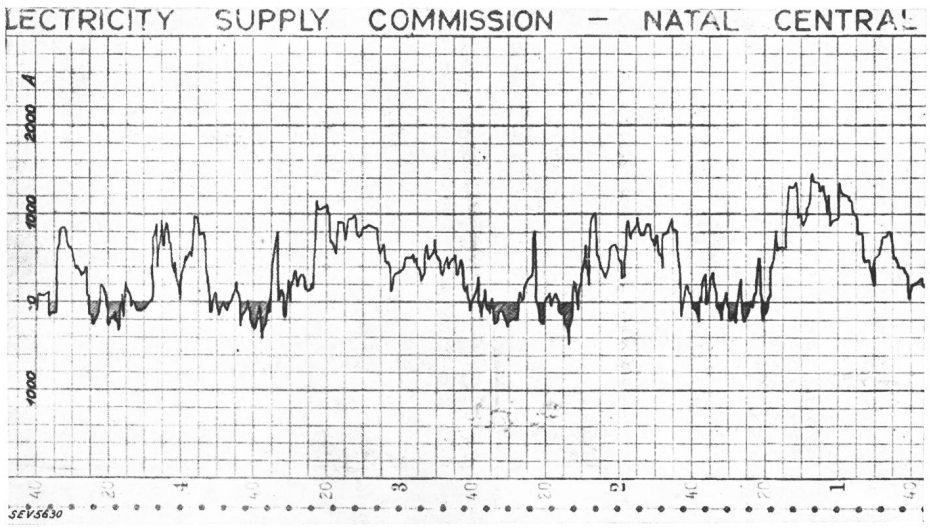

Fig. 6.
Belastungsdiagramm der gesamten Anlage des Unterwerkes Van Reenen der Electricity Supply Commission für die Südafrikanischen Bahnen.

halb der Umschaltgeraden und die Rekuperationsleistung auf. Man umgeht bei dieser Lösung das öftere Arbeiten des Umschaltmechanismus und hat bei Leistungsschwankungen um Null einen Wechselstrom-Gleichstrom- und einen Gleichstrom-Wechselstrom-Mutator im Parallelbetrieb und daher eine eindeutig bestimmte Gleichspannung. Erst bei grosser Energieentnahme aus dem Gleichstromnetz, wo der Wechselstrom-Gleichstrom-Mutator längere Zeit überlastet werden könnte, wird der Gleichstrom-Wechselstrom-Mutator zur Deckung der Spitzen mit herbeigezogen. Man erkennt aus dem Diagramm, dass beide Mutatoren zu ungefähr gleichem Betrage an der Energielieferung bzw. -entnahme beteiligt sind.

Die praktische Ausführung der drei erwähnten Rekuperationsmethoden wurde bereits erprobt. Bei den südafrikanischen Bahnen sind zwei Unterstationen für Rekuperation schon über ein Jahr mit vollem Erfolg in Betrieb [4]). Fig. 6 zeigt einen Registrierstreifen des Unterwerkes Van Reenen, auf dem man den Verlauf des Belastungs- und Rekuperationsstromes erkennen kann.

Ein umschaltbarer Mutator wurde erstmalig in der Unterstation Cava dei Tirreni der italienischen Staatsbahnen aufgestellt. Die in dieser Anlage in zwei verschiedenen Schaltungen erzielten Betriebsresultate sind aus Fig. 7 und 8 zu ersehen. Das Diagramm der Fig. 7 zeigt den Parallelbetrieb eines Wechselstrom-Gleichstrom-Mutators mit einem umschaltbaren Mutator. Die links angegebene Kurve ist die Gleichspannung und die rechts angegebene der Gleichstrom des umschaltbaren Mutators. Der Strom i_0 bedeutet den sog. Zirkulationsstrom, der vom Wechselstrom-Gleichstrom-Mutator zum Gleichstrom-Wechselstrom-Mutator fliesst und für dauernde Erwärmung der Mutatoren sorgt. Beim Ueberschreiten der kritischen Stationslast schaltet der eine Mutator auf Wechselstrom - Gleichstrom - Betrieb um und gibt eine entsprechend grosse Leistung ab. Bei Unterschreiten der kritischen Stationslast geht der umschaltbare Mutator wieder in den Gleichstrom-Wechselstrom-Betrieb über. Der Vorgang wiederholt sich auf dem Bilde zweimal und dann bleibt der umschaltbare Mutator im Gleichstrom - Wechselstrom-Betrieb und nimmt bis 390 A Rekuperationsstrom auf.

Das Diagramm Fig. 8 zeigt einen Betriebsfall mit alleiniger Netzspannung durch den umschaltbaren Mutator. Dieser übernimmt den ganzen, d. h. sowohl positiven als auch negativen Betriebsstrom der Anlage und muss deshalb öfters umschalten. Man erkennt wieder auf dem Diagramm links die Spannung und rechts den Strom des umschaltbaren Mutators. Bei a manövriert ein Zug in der Station Cava. Bei b fährt dieser Zug an und bei c wird auf

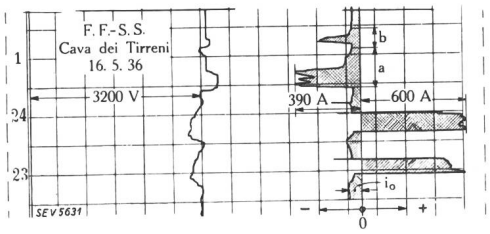

Fig. 7.
Unterstation Cava dei Tirreni der italienischen Staatsbahnen. Umschaltbarer Mutator im Parallelbetrieb mit Wechselstrom-Gleichstrom-Mutator. Links Gleichspannung, rechts Gleichstrom. i_0 = Zirkulationsstrom. Papiervorschub 120 mm/h.

der Talfahrt rekuperiert. Versuchsweise werden zweimal bei voller Talfahrt die Bremsen angezogen, wodurch die Rekuperationslast verschwindet und der Mutator sofort auf Wechselstrom-Gleichstrom-Betrieb umschaltet. Bei d fährt der Zug in die nächste Station ein, bei e fährt er wieder an und bei f setzt voller Rekuperationsbetrieb ein. Man er-

[4]) A. Leuthold, Brown-Boveri-Mitt., Juli 1935, S. 142.

kennt aus diesen Diagrammen, dass die in Fig. 5 angegebenen Möglichkeiten alle erfolgreich ausprobiert worden sind.

Eine weitere Anwendung des Mutators ist die Speisung von Rundfunksendern mit hochgespanntem Gleichstrom. Es sei erwähnt, dass z. B. unser Landessender Beromünster von einem Hochspannungsmutator für 20 kV gespeist wird.

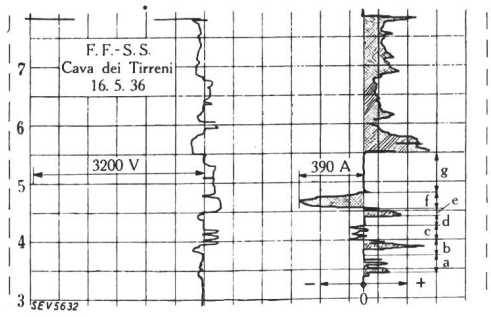

Fig. 8.
Unterstation Cava dei Tirreni der italienischen Staatsbahnen. Der umschaltbare Mutator übernimmt sowohl die ganze Leistungsabgabe an das Gleichstromnetz, als auch die Rekuperationsleistung. Links Gleichspannung, rechts Gleichstrom. Papiervorschub 120 mm/h.

Ein neues Anwendungsgebiet für den Mutator ist die Energieübertragung mit hochgespanntem Gleichstrom. Schon Thury hat vor vielen Jahren auf die Vorteile dieses Systems hingewiesen [5]), er hat sogar Gleichstrom-Uebertragungsleitungen gebaut, wovon noch heute eine im Betrieb ist. Die Energieübertragung mit Gleichstrom hat gegenüber derjenigen mit Drehstrom den Vorteil der besseren Ausnützung der Isolation, der Verkleinerung der Koronaverluste und des Wegfalles von Blindstrom und den damit verbundenen Verlusten. Ein wesentlicher Punkt ist die Stabilität der durch die Uebertragungsleitung gekuppelten Netze, die bei Drehstrom Schwierig-

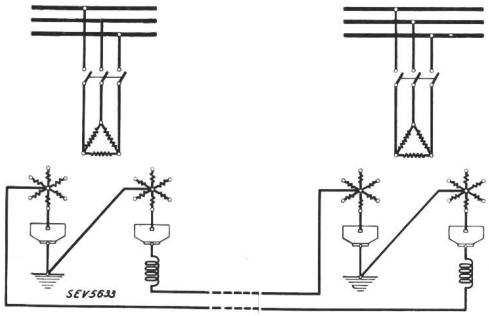

Fig. 9.
Prinzipschaltbild einer Energieübertragung mit hochgespanntem Gleichstrom.

keiten bereitet. Die Uebertragung mit hochgespanntem Gleichstrom lässt die Möglichkeit erkennen, statt Freileitungen Kabel zu verwenden. Die prinzipielle Anordnung einer solchen Uebertragung ist aus Fig. 9 zu ersehen, wo auf der Sender- und Empfängerseite je zwei Mutatoren in Serie geschaltet sind. Die Serieschaltung erlaubt, beliebig hohe Gleichspannungen zu erreichen. Im Beispiel, das Fig. 9 zeigt, würde bei einer Gleichspannung von 50 kV pro Mutator eine Uebertragungsspannung von 100 kV erreicht. Rechnet man mit einem Kathodenstrom von nur 300 A, so könnten auf einer solchen Leitung bereits 30 000 kW übertragen werden. Statt, wie in der Figur angegeben, den Mittelpunkt zu erden, kann man auch den einen Pol an Erde legen und erhält so die Möglichkeit, die ganze Energie mit einer einzigen Leitung und Rückfluss durch die Erde zu übertragen. Die Regelung der Grösse und Richtung der übertragenen Energie erfolgt mit Hilfe der Gittersteuerung. Die Zu- und Abschaltung kann ebenfalls mit Gitter oder auch zweckmässig auf der Drehstromseite vorgenommen werden. Der erste Schritt zur Lösung dieses Problems ist die Schaffung eines Mutators möglichst hoher Spannung und Einheitsleistung. Dahingehende Bemühungen hatten Erfolg; es ist bereits gelungen, mit einem einzigen Mutator für 2000 kW 60 kV

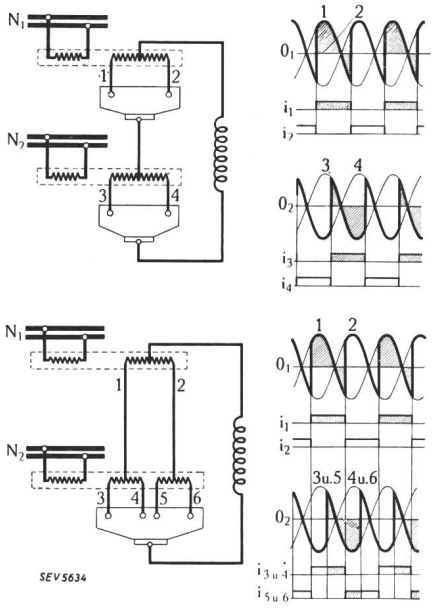

Fig. 10.
Zusammenstellung zur Erläuterung der Wirkungsweise von Wechselstrom-Wechselstrom-Mutatoren.

Rechts sind die gezündeten Spannungen und die Anodenströme aufgetragen.

Oben: Elastische Kupplung zweier Einphasennetze N_1 und N_2 mit 2 Mutatoren über Gleichstrom.

Unten: Elastische Kupplung zweier Einphasennetze N_1 und N_2 mit Hilfe eines einzigen Mutators.

Gleichspannung zu erzeugen. Wenn man bedenkt, dass im Betrieb die Spannung zwischen Anode und Kathode den doppelten Wert der Gleichspannung erreicht, so ergibt sich, dass 120 kV im Vakuum mit Hg-Dampf gehalten wurden. Es ist heute ungewiss, wie weit dieses Resultat noch verbessert werden kann, aber die Grenze des Möglichen wurde bestimmt nicht erreicht [6]).

Eine besonders interessante Anwendung des Mutators ist die elastische Kupplung von Wechselstromnetzen gleicher oder verschiedener Frequenz. Die scheinbar komplizierte Wirkungsweise eines Wechselstrom-Wechselstrom-Mutators geht aus Fig. 10 hervor. Dort ist oben die Kupplung zweier Einphasennetze mit Hilfe zweier Mutatoren angegeben, wo der eine den Wechselstrom in Gleichstrom und der andere den Gleichstrom wieder in Wechselstrom umformt. Rechts daneben sieht man die ge-

[5]) Vgl. Bull. SEV 1930, S. 157.

[6]) Vgl. auch E. Kern: Ein Ausblick auf die Gleichstrom-Kraftübertragung der Zukunft, Bull. SEV 1933, Nr. 13, S. 281.

zündeten Spannungen dieser beiden Mutatoren und die zugehörigen Anodenströme. Wird jetzt, wie im unteren Teil der Fig. 10 angegeben ist, der eine Mutator weggelassen und dafür der andere mit doppelter Anodenzahl ausgeführt, so erhält man eine Schaltung, deren Wirkung genau dieselbe ist wie die der oberen. Der Unterschied ist der, dass jetzt der Mutator sowohl im Wechselstrom-Gleichstrom- als auch gleichzeitig im Gleichstrom-Wechselstrom-Betrieb arbeiten muss und dass dafür der Lichtbogenabfall nur einmal im Gleichstromkreise auftritt. Die gezündeten Spannungen dieses Mutators in bezug auf das Netz N_1, bzw. N_2, sind ebenfalls rechts angegeben und man erkennt die Uebereinstimmung mit den oberen Kurven. Die Anodenströme haben den gleichen Verlauf wie oben; nur verteilen sie sich im unteren Diagramm auf vier Anoden, wie aus dem Kurvenbilde zu ersehen ist. Die durch den Wechselstrom-Wechselstrom-Mutator fliessende Energie wird in ihrer Richtung und Grösse mit Hilfe der Gitterspannung durch Einstellung der gezündeten Spannungen geregelt. Der Wirkungsgrad eines Wechselstrom-Wechselstrom-Mutators ist gegenüber rotierenden Umformern namentlich bei kleinen Belastungen erheblich besser, weil die Leerlaufverluste des Mutators viel kleiner sind als diejenigen der Maschinen.

Die Verwendung eines Wechselstrom-Wechselstrom-Mutators zur Kupplung von Netzen verschiedener Frequenz ist verständlich und gegeben; hingegen ist nicht ohne weiteres einzusehen, wozu Netze gleicher Frequenz mit Hilfe eines Mutators gekuppelt werden sollen. Die folgende Ueberlegung soll diesen Fall erläutern. Wir nehmen an, dass von einem Kraftwerk aus erstens ein Ortsnetz gespeist werde und dass zweitens an einen Grossabnehmer eine konstante Energiequote z. B. über eine Fernleitung abzugeben sei. Der Betriebsleiter hat dann die Aufgabe, die über die Fernleitung fliessende Energie konstant zu halten, was er durch entsprechende Regulierung seiner Primärmotoren (Turbinen) erreichen kann. Wird jedoch von demselben Kraftwerk aus noch ein zweiter Grossabnehmer mit einer andern konstanten Energiequote gespeist, so hat es der Betriebsleiter nicht mehr in der Hand, zwei konstante Energiequoten gleichzeitig einzuhalten. Bisher hat man sich dadurch geholfen, dass man die Sammelschienen des Kraftwerkes aufteilte und entsprechend der Anzahl Bezüger von konstanter Energie mehrere Separatbetriebe einrichtete. Dies hat den Nachteil, dass ein Grosskraftwerk durch diese Aufteilung in kleinere Kraftwerke aufgeteilt wird.

Schaltet man jedoch in jede abgehende Leitung mit konstanter Energiequote einen Wechselstrom-Wechselstrom-Mutator, so kann mit Hilfe der Gittersteuerung die über ihn fliessende Energie nach Belieben und unabhängig von den Frequenzen der gekuppelten Netze eingestellt werden. Die Generatoren können wieder alle auf eine gemeinsame Sammelschiene geschaltet werden. Durch den Dreiphasen-Dreiphasen-Mutator wird die unabhängige Betriebsführung der einzelnen Kraftwerke wieder hergestellt.

Fig. 11 zeigt die Schaltung eines Dreiphasen-Dreiphasen-Mutators zur elastischen Kupplung von zwei Drehstromnetzen. Im Schaltbild sind die Verbindungen zwischen den beiden Transformatoren nur für eine Phase gezeichnet [7]). Die Analogie zur Fig. 10 ist leicht erkennbar, indem die beiden Transformatoren ebenfalls in Serie geschaltet sind, wobei der zweite Transformator eine doppelte Sekundärwicklung erhält. Die drei Nullpunkte des Transformators links werden an eine dreischenklige Saugdrosselspule angeschlossen, die den Energieausgleich zwischen den einzelnen Phasen besorgt derart, dass, wenn eine Phase des einen Netzes im Energiemaximum steht und die mit ihr gekuppelte Phase des andern Netzes ein Energieminimum hat, der Leistungsausgleich über die Saugdrosselspule erfolgen

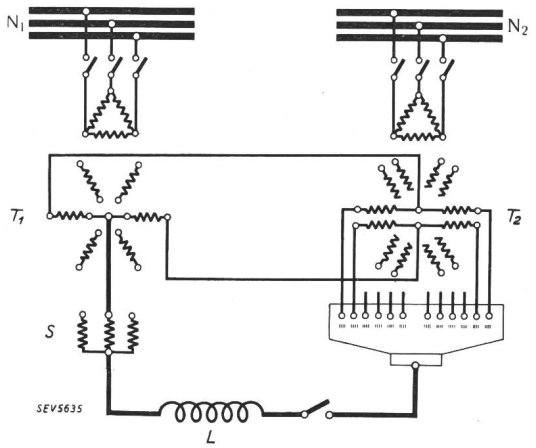

Fig. 11.
Prinzipschaltbild eines Dreiphasen-Dreiphasen-Mutators zur elastischen Kupplung zweier Drehstromnetze gleicher oder verschiedener Frequenz.

T_1 Transformator des Netzes N_1 mit einfacher Sekundärwicklung.
T_2 Transformator des Netzes N_2 mit doppelter Sekundärwicklung.
S Dreischenklige Saugdrosselspule zum Energieausgleich zwischen den Phasen.
L Drosselspule zur Aufnahme der Oberwellen der Anodenfrequenz.

kann. Besonders einfach ist die Inbetriebsetzung eines solchen Mutators. Es wird vorerst der Oelschalter des einen und dann der Oelschalter des andern Transformators eingelegt. Dadurch kommen beide Transformatoren unter Spannung und die hier nicht eingezeichnete Gittersteuerung setzt automatisch ein. Man braucht nur noch den Schalter in der Kathodenleitung zu schliessen und die Anlage geht ohne irgendwelches Synchronisieren in Betrieb.

Ein anderer Wechselstrom-Wechselstrom-Mutator ist der Dreiphasen-Einphasen-Mutator zur elastischen Kupplung eines Drehstromnetzes 50 Per./s mit einem Einphasennetz $16^2/_3$ Per./s [8]). Diese Art der Kupplung ist etwas schwieriger als die letztge-

[7]) E. Kern, Brown-Boveri-Mitt., Dez. 1934, S. 214.

[8]) Vgl. Feinberg, Die Gittersteuerung beim unmittelbaren Drehstrom-Einphasenstrom-Mutator. Bull. SEV 1936, Nr. 20, S. 566.

nannte, weil die Drehstromenergie zeitlich konstant und die Einphasenenergie pulsierend ist [9]). Die Umformung einer Energie in die andere kann mit Hilfe eines Mutators, der an sich nur ein Schaltapparat ist, nicht vorgenommen werden, wenn nicht gleichzeitig durch geeignete Mittel eine Energiespeicherung vorgesehen wird, die den Ausgleich besorgt. Diese Speicherung erfolgt in besonders eleganter Weise, wenn man Drosselspulen und Kondensatoren dazu benützt, die gleichzeitig die Kurvenform der Einphasenspannung und des Einphasenstromes sinusförmig gestalten. Die Ausnützung der Kondensatoren ist doppelt, weil diese gleichzeitig zur Lieferung des erforderlichen Blindstromes für das Einphasennetz benützt werden. Ohne in diesem Zusammenhange auf eine nähere Beschreibung des ganzen Systems einzugehen, kann man schon aus den in Fig. 12 gezeigten Oszillogrammen einige interessante Feststellungen machen. Rechts sieht man die sinusförmigen Spannungen des Drehstromnetzes und des Einphasennetzes und erkennt aus den untereinander stehenden Oszillogrammen, wie die beiden Spannungen elastisch aneinander vorübergleiten. Der genauere Mechanismus dieser Elastizität ist aus den linksstehenden Oszillogrammen zu entnehmen, wo nämlich zwei Anodenströme und ihr gegenseitiges Sich-Ueberschneiden erkennen lassen, wie der Aufbau des Einphasenstromes aus Teilstücken des Drehstromes erfolgt.

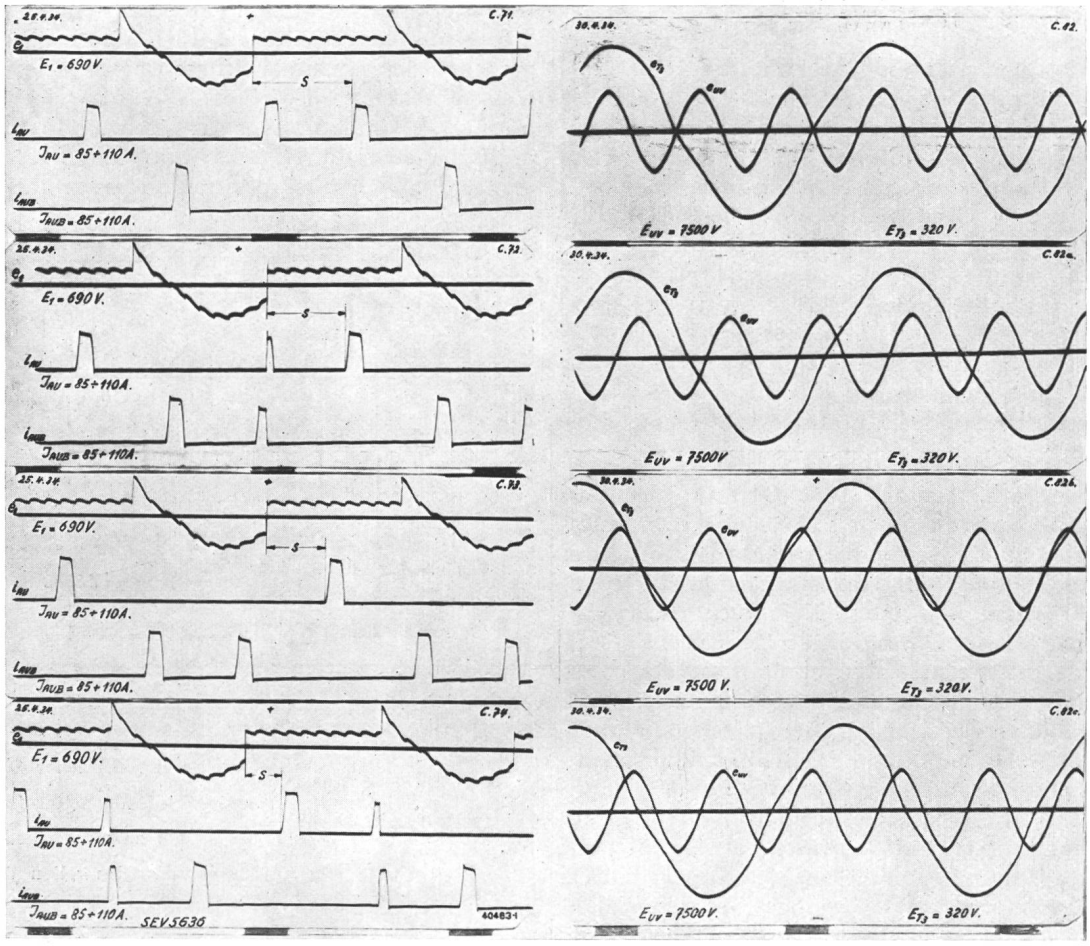

Fig. 12.

Dreiphasen-Einphasen-Mutator zur elastischen Kupplung eines Drehstromnetzes 50 Per./s mit einem Einphasennetz 16 ⅔ Per./s.

e_1 = Spannung zwischen Kathode und einem Nullpunkt des Transformators 50 Per./s.
J_{AU} = Anodenstrom der Phase U des Systems I.
J_{AUB} = Anodenstrom der Phase U_B des Systems II.
e_{UV} = Verkettete Spannung des Drehstromnetzes.
e_{T3} = Spannung des Einphasennetzes.

Man erkennt das stetige Vorbeigleiten sowohl der Anodenströme als auch der Spannung 50 Per./s gegenüber der Einphasenspannung 16 ⅔ Per./s.

Bei diesen Ausführungen wurde bewusst auf die Erläuterung der rein physikalischen Vorgänge im Mutator verzichtet, um die Bedeutung der zahlreichen neuen Anwendungen des Mutators eingehender behandeln zu können. Zusammenfassend hat sich ergeben, dass der Kurzschluss- und Rückzündungsschutz durch gesteuerte Gitter, die Regulierung der Gleichspannung, bzw. des Gleichstromes, verschiedene neuartige Lösungen des Rekuperationsproblems mit Mutatoren und die elastische Netzkupplung bereits praktisch erprobt worden sind.

[9]) Ch. Ehrensperger, Brown-Boveri-Mitt., Juni 1936, S. 96.

Die Entwicklung der Zukunft gilt vor allem der Schaffung von Mutatoren grosser Leistung, sowohl für grosse Ströme als auch für hohe Spannungen. Es ist in ganz besonderem Masse der Tatkraft der schweizerischen Industrie zuzuschreiben, dass aus einer über 30 Jahre alten ausländischen Erfindung ein Apparat für jeden beliebigen Umformungszweck geschaffen worden ist.

Auszug[1]) aus dem Referat

von

Herrn Dr. *W. Dällenbach*,
S. A. des Ateliers de Sécheron, Genf, und Julius Pintsch A.-G., Berlin.

über

Grossgleichrichter[2]) ohne Vakuumpumpe.

Die früheren Messungen des Autors über Wasserstoffdiffusion bei Vakuumgefässen aus Eisen werden bestätigt. Ein Gleichrichter für 200 A bei 600 V mit Vakuumgefäss aus Eisen, ohne Vakuumpumpe und mit unmittelbarer Luftkühlung wird beschrieben. Der Gleichrichter ist auch im kalten Zustand überlastbar und kann als Freiluft-Typ gebaut werden.

L'auteur communique que les anciennes mesures sur la diffusion de l'hydrogène dans les récipients à vide, en fer, ont été confirmées. Il décrit ensuite un redresseur à cuve de fer, pour 200 A sous 600 V, sans pompe à vide, à refroidissement direct à air. Ce redresseur peut être surchargé à froid et on peut le construire pour montage en plein air.

In einer früheren Mitteilung[3]) berichtete ich über vakuumtechnische Arbeiten, durch welche es möglich geworden ist, Grossgleichrichter dauernd ohne Vakuumpumpe zu betreiben. Ein wesentliches Ergebnis jener Untersuchungen ist die Tatsache, dass Wasserstoffionen aus dem Kühlwasser durch die Eisenwandungen des Gleichrichtergefässes hindurch diffundieren, den für störungsfreie Arbeitsweise erforderlichen Entgasungszustand beeinträchtigen und den pumpenlosen Betrieb unmöglich machen. Dagegen können Grossgleichrichter dauernd ohne Vakuumpumpe betrieben werden, wenn statt Wasser eine von Wasserstoffionen freie Kühlflüssigkeit benutzt wird oder wenn die Gefässwandungen aus einem Material bestehen oder mit einem Material dicht überzogen sind, welches die Eigenschaft hat, aus dem Kühlwasser keine Wasserstoffionen aufzunehmen.

Diese Ergebnisse unserer Untersuchungen wurden bezweifelt[4]). Inzwischen hat das Physikalisch-chemische Institut der Universität Berlin unter Leitung von Herrn Prof. Bodenstein unsere Messungen wiederholt und in vollem Umfang bestätigen können. Herr Prof. Bodenstein hat darüber ein ausführliches Gutachten erstattet. Eine grosse Zahl weiterer Beobachtungen, welche wir seit meiner ersten Mitteilung gemacht haben, geben ebenfalls keine Veranlassung, Berichtigungen an den damals mitgeteilten Ergebnissen und Ueberlegungen vorzunehmen.

Im folgenden soll über einige Resultate weiterer Entwicklungsarbeiten an Grossgleichrichtern ohne Vakuumpumpe berichtet werden:

Elektrodeneinführung. Ursprünglich habe ich zur Stromeinführung in Grossgleichrichter ohne Vakuumpumpe ein Glasrohr als Isolator verwendet, welches an jedem Ende mit je einem Metallrohr direkt verschmolzen war. Das eine Metallrohr wurde mit dem stromeinführenden Leiter, das andere mit der Gefässwand vakuumdicht verschweisst.

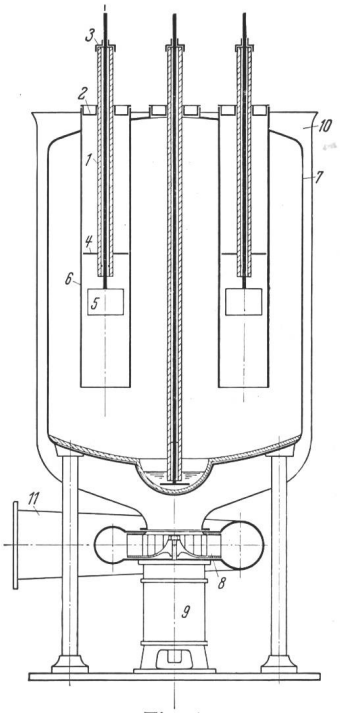

Fig. 1.
Schnitt durch einen Gleichrichter, 200 A, 600 V.

1 keramisches Rohr
2, 3 Metallmembran
4 Stützblech
5 Anode
6 Anodenschutzrohr
7 Gefässwand
8 Ventilator
9 Motor
10 Lufteintritt
11 Luftaustritt

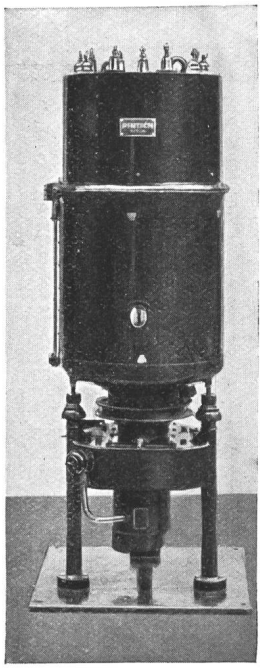

Fig. 2.
Ansicht eines Gleichrichters ohne Vakuumpumpe, 200 A, 600 V.

Das Glasrohr musste durch besondere Massnahmen gegen mechanische und elektrische Beanspruchungen geschützt werden. Gegenüber einer derartigen Konstruktion konnte, wie Fig. 1 zeigt, die Elektrodeneinführung wesentlich vereinfacht werden durch Anwendung eines Glas- oder Emailflusses

[1]) Der Vortrag von Herrn Dr. W. Dällenbach ist nur auszugsweise wiedergegeben; der vollständige Wortlaut wurde in der ETZ, Bd. 57 (1936), S. 937, Heft 33, vom 13. Aug. 1936 veröffentlicht.

[2]) Auf Wunsch des Autors «Gleichrichter» statt «Mutator», siehe Einleitung Seite 685.

[3]) W. Dällenbach, ETZ, Bd. 55 (1934), S. 85; siehe Referat im Bull. SEV 1934, Nr. 7, S. 179.

[4]) Brown, Boveri-Mitt. 1935, Nr. 1/2, S. 63.

als vakuumdichter Verbindung zwischen einem keramischen Rohr 1 und den nachgiebigen Metallmembranen 2 und 3. Die neue Elektrodeneinführung kann ohne Schaden auf über 500° erhitzt werden.

Kühlung mit atmosphärischer Luft. In Versuchen, welche sich insgesamt über viele Monate erstreckten, zeigte sich, dass pumpenloser Betrieb von Grossgleichrichtern auch bei unmittelbarer Kühlung mit atmosphärischer Luft möglich ist. Dieses Ergebnis war nicht vorauszusehen, denn an der Oberfläche von Metallwandungen sind bekanntlich übereinander viele Lagen von Wassermolekülen adsorbiert. Diese adsorbierte Wasserschicht wird bei unmittelbarer Kühlung mit atmosphärischer Luft dauernd aus dem Wasserdampf der Atmosphäre ergänzt. Wieso aus dieser adsorbierten Wasserschicht der Wasserstoff nicht in gleicher Weise wie aus dem Kühlwasser durch die Eisenwandung hindurch ins Innere des Vakuums diffundiert, ist zur Zeit noch unaufgeklärt.

Fig. 1 zeigt einen Schnitt, Fig. 2 eine Ansicht eines Gleichrichtergefässes für 200 A Gleichstrom, 600 V Gleichspannung und unmittelbare Kühlung mit atmosphärischer Luft. Das Gefäss ist seit nahezu einem Jahr ohne Rückzündungen und ohne Beeinträchtigung des Vakuums in einem Bahnkraftwerk in Betrieb.

Vergleich von Vakuumgefässen aus Metall mit solchen aus Glas in bezug auf Gasaufzehrung. Fig. 3 zeigt zwei vollkommen gleichgebaute einanodige Gleichrichtergefässe. Unten befindet sich die Quecksilberkathode, in der kugelförmigen Erweiterung oben die Anode aus vakuumgeschmolzenem Eisen. Die beiden Gefässe unterscheiden sich nur dadurch voneinander, dass das Gefäss links ganz aus Glas, das Gefäss rechts dagegen im rohrförmigen Mittelstück zwischen Kathode und Anode aus Eisen, im übrigen ebenfalls aus Glas besteht. Ausgehend vom hochentgasten Zustand wurden während der Belastung mit ein und derselben Gleichstromstärke in beide Gefässe kleine Mengen von Wasserstoff eingeführt und der Lichtbogenabfall sowie der Gasdruck in Abhängigkeit von der Brennstundenzahl beobachtet. Die Ergebnisse sind in Fig. 4 und 5 aufgezeichnet. Obschon der Metallröhre pro Brennstunde ungefähr eine dreimal grössere Wasserstoffmenge zugeführt wurde als der Glasröhre, blieben Lichtbogenabfall und Gasdruck bei der Metallröhre ganz erheblich unter den entsprechenden Werten bei der Glasröhre. Die Aufzehrung des Wasserstoffs durch die Gasentladung geht also bei der Metallröhre viel rascher vor sich als bei der Glasröhre. Die Gründe sind folgende: Der Wasserstoff wird durch die Lichtbogenentladung ionisiert. Die Wasserstoffionen können in die Metallwand eindringen und durch diese hindurch ins Freie entweichen, während ein Eindringen von Wasserstoffionen und ihre Diffusion in der Glaswand nicht möglich sind. Bei der Glasröhre wird der durch die Entladung ionisierte Wasserstoff ausschliesslich von den Elektroden, insbesondere von der Quecksilberkathode aufgenommen und zum Teil wieder abgegeben, wie aus etwa 20 im Kathodenquecksilber beobachteten Gasblasen geschlossen werden kann. Gleichrichter mit Eisengefäss haben also gegenüber solchen mit Glasgefäss den weiteren erheblichen Vorteil, dass

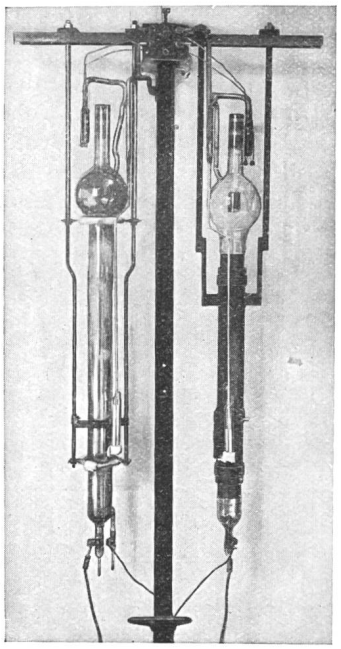

Fig. 3.
Versuchsanordnung (Glas- und Metallrohr) zum Vergleich von Glas- und Eisengleichrichtern.

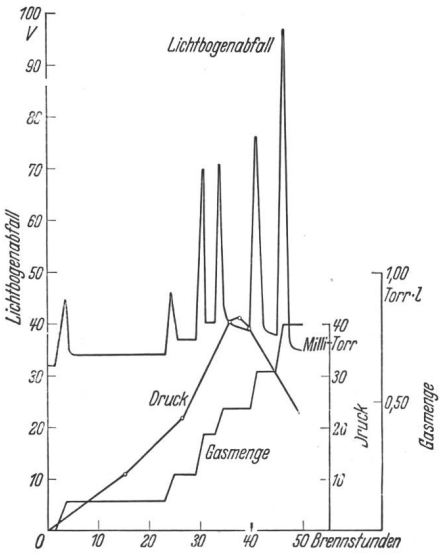

Fig. 4.
Wasserstoffaufzehrung bei Glasrohr.

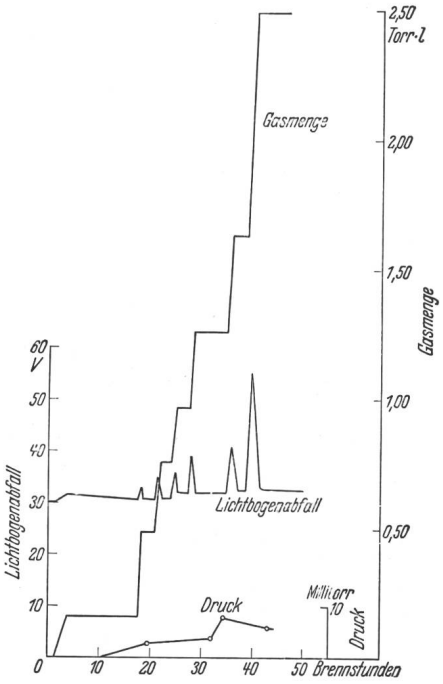

Fig. 5.
Wasserstoffaufzehrung bei Metallrohr.

die Eisenwandung im Gegensatz zur Glaswandung gasaufzehrend wirkt, was eine dauernde Verbesserung des Vakuums zur Folge hat.

Grossgleichrichter als Freiluft-Typ, betriebsbereit und überlastbar bei Temperaturen bis min. 30°. Der Quecksilberdampfgleichrichter hat bekanntlich bisher [5]) [6]) in der Stromstärke eine wohl definierte und einwandfrei wiederholbare Belastungsgrenze, den sogenannten Grenzstrom. Beim Erreichen dieses Grenzstroms zeigen sich folgende Erscheinungen:

a) der Lichtbogenabfall steigt steil an;

b) gewöhnlich treten in Verbindung damit Ueberspannungen auf, welche Ueberschläge der Isolatoren zur Folge haben können;

c) es treten Rückzündungen auf.

Dieser Grenzstrom liegt um so höher, je höher die Quecksilberdampfdichte im Anodenraum, also auch je höher die Gefässtemperatur gewählt wird. Auf das Bestehen dieser Belastungsgrenze und ihre Temperaturabhängigkeit ist es zurückzuführen, dass sowohl die von der CEI [7]) als auch vom VDE [8]) aufgestellten Entwürfe zu Regeln für die Prüfung von Gleichrichtern Ueberlastungen bei kaltem Gefäss nicht vorschreiben, sondern zulassen, dass Ueberlastungen im Anschluss an Dauernennlast, also im betriebswarmen Zustand des Apparates vorgenommen werden dürfen. Diesen Regeln liegt die dem Gleichrichterfachmann seit langem geläufige Erfahrung zugrunde, dass kalte Gleichrichterzylinder selbst beim Einschalten auf Teillast Ueberspannungen und Rückzündungen zeigen können.

Zum gleichen Erscheinungsbereich gehören die Ueberspannungen, auf welche Ingenieure von Bahngesellschaften hingewiesen haben, als sie die Frage aufwarfen, ob bei Fahrdrahtspeisung aus Gleichrichtern eine Verstärkung der Leitungsisolation erforderlich sei. Hierüber haben Untersuchungen stattgefunden, mit dem Ergebnis, dass im Gleichstromkreis Ueberspannungen verhältnismässig unbedeutend und Verstärkungen der Fahrdrahtisolation usw. also nicht erforderlich seien. Die Ursache der behaupteten Ueberspannungen konnte in jenen Untersuchungen nicht geklärt werden [9]). Es fehlt im Bericht über diese Versuche auch jede Angabe über die Temperatur der Gleichrichtergefässe, woraus geschlossen werden kann, dass deren Bedeutung für die Frage der Ueberspannungen nicht berücksichtigt worden ist.

Bei der Gleichrichterkonstruktion nach Fig. 1 und 2 konnte die Belastungsgrenze oder der sogenannte Grenzstrom des Apparates, *auch für den vollkommen kalten Zustand*, dank besonderer Massnahmen, über welche in einer späteren Veröffentlichung berichtet werden wird, so hoch hinaufgerückt werden, dass der Lichtbogenabfall beim Nennstrom von 200 A nur 19 V beträgt und bei der 3,5fachen Ueberlast, also 700 A, einen Scheitelwert von nur 26 V erreicht, ohne dass damit irgendeine Grenze der Ueberlastbarkeit gegeben wäre. Der Apparat kann also bei wetterfester Ausbildung der äusseren Isolatoren ohne weiteres als Freiluft-Typ aufgestellt werden und ist in der angegebenen Weise überlastbar bis zu Temperaturen von minus 30° C.

Grenzstrommesser. Die bisher verwendeten Hitzdrahtvakuummeter sind bei vakuumtechnisch einwandfreier Herstellung der Gleichrichtergefässe überflüssig, dagegen ist ein einfaches und robustes Instrument zur Ueberwachung des Quecksilberdampfdruckes von Wert. Fig. 6 zeigt für verschiedene Quecksilberdampfdrücke die Strom-Spannungs-Kennlinien an einer in besonderer Weise ausgebildeten Anode, welche unmittelbar die Messung der mit dem Quecksilberdampfdruck zunehmenden Belastungsgrenze, also des sogenannten Grenzstromes des Apparates erlaubt. Man erkennt, dass mit wachsendem Lichtbogenabfall der Strom über den Grenzstrommesser einem Sättigungswert zustrebt. Dieser Sättigungswert dient zur Anzeige und ist um so grösser, ein je höherer Quecksilberdampfdruck in der Nähe der Anode des Grenzstrommessers herrscht.

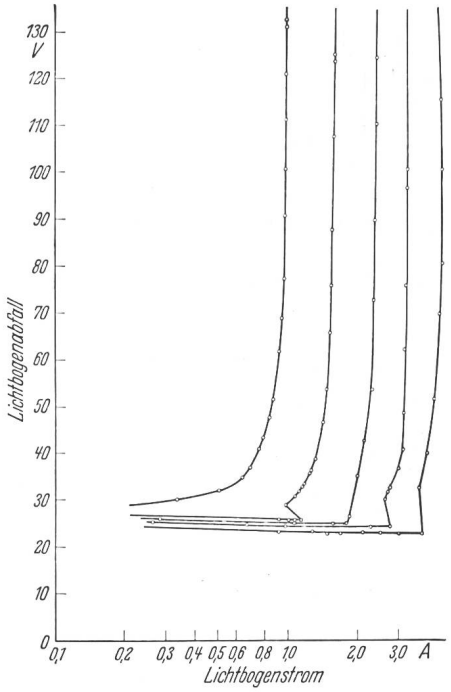

Fig. 6.
Strom-Spannungs-Kennlinien des Grenzstrommessers.

Zum Schluss bleibt mir die angenehme Pflicht, meinem engen Mitarbeiter, Herrn Eduard Gerecke, sowie den Herren Gustav Oesch und Rudolf Surber für die Durchführung der Versuche und den beiden Firmen S. A. des Ateliers de Sécheron, Genf, und Julius Pintsch A.-G., Berlin, welche die Arbeiten finanziell ermöglicht haben, herzlich zu danken.

[5]) Langmuir und Mott-Smith, Gen. electr. Rev., Bd. 27 (1924), insbesondere S. 770 u. 771.

[6]) Hull u. Brown, Trans. Amer. Inst. electr. Engr., Bd. 50 (1931), S. 744, vgl. a. J. Amer. Inst. electr. Engr., Bd. 50 (1931), S. 788 und Bd. 53 (1934), S. 1435.

[7]) Commission Electrotechnique Internat., Mitteilung des Bureau Central vom 19. Aug. 1935 an die National-Komitees.

[8]) Entwurf VDE 0555: ETZ 57 (1936), S. 75.

[9]) CEI, Dokumente 9 (Schweiz) 104, 105 u. 106.

Diskussionsbeitrag

von Herrn *A. Gaudenzi*,
Ingenieur der A.-G. Brown, Boveri & Cie., Baden.

Gestatten Sie mir einige ergänzende Angaben zur Frage der Wasserstoffdiffusion und zu dem Mutator aus Metall ohne Pumpe. Ich beziehe mich dabei auf den Vortrag von Herrn Dr. Dällenbach, auf seine Veröffentlichung in der ETZ vom 25. Januar 1934 und auf unsere Versuchsresultate, veröffentlicht in den Brown-Boveri-Mitt. 1935, Nrn. 1/2, S. 63. Unsere Laboratoriumsversuche mit evakuierten, blanken Eisenrohren in destilliertem Wasser von 90° C (Diffusionskonstante $3100 \cdot 10^{-5} \frac{cm^3\ mm\ Hg}{cm^2\ h}$) stimmen ungefähr mit denjenigen von Herrn Dr. Dällenbach bei 95° C (Diff.-Konstante $27\,700 \cdot 10^{-5}$) überein, wenn man die starke Abhängigkeit der H-Diffusion von der Wassertemperatur berücksichtigt; d. h. wir haben diese sehr interessante Erscheinung nachträglich auch bestätigt gefunden. Betrachtet man aber unsere Diffusionskonstante von $156 \cdot 10^{-5}$ für blanke Stahlrohre in Leitungswasser von 60° C (max. Kühlwassertemperatur für Mutatoren), dann ist das nur 0,56 % von $27\,700 \cdot 10^{-5}$, also so wenig, dass ein normaler Mutator *selbst mit blanker, wasserbenetzter* Aussenoberfläche von dieser sehr geringen Wasserstoffdiffusion nichts Nachteiliges merkt, weil die Vakuumpumpe hoher Saugleistung das wenige, eindringende H-Gas sofort wegschafft. Alle von uns gelieferten Zylinder werden nun mit einem Rostschutzanstrich versehen. Dadurch wird die schon ohne Rostschutz ganz ungefährliche Wasserstoffdiffusion ganz bedeutungslos. Die Diffusionskonstante sinkt nämlich in diesem Fall für 60° C Kühlwassertemperatur von $156 \cdot 10^{-5}$ auf $0{,}6 \cdot 10^{-5}$ und bleibt auch bei 95° C auf diesem ausserordentlich tiefen Wert, d. h. der Anstrich dichtet vollkommen gegen Wasserstoff. Ein praktisches Beispiel soll dies noch eindringlicher zeigen. Auf unsere Veranlassung wurden auf einer Anlage die Hoch- und Vorpumpe eines ganz normalen Mutators (Hg- und Gummi-Dichtungen), der seit 1925 in Betrieb ist, während eines ganzen Jahres (1934/35) stillgesetzt. (Mittlere Kühlwassertemperatur 30° C, tägliche Lastdauer 18 Std.). Als Abschluss gegen die Atmosphäre war einzig der Hahn unter Oel in der Vorpumpe vorhanden und trotzdem stieg der Restgasdruck, am Hitzdrahtvakuummeter abgelesen, während dieses Jahres nicht höher als auf $5 \ldots 7 \cdot 10^{-3}$ mm Hg, ein Beweis für seine vorzügliche Dichtigkeit auch gegen Wasserstoff. Bestände eine Wasserstoffdiffusion, dann hätte der Restgasdruck im Zylinder in einem Jahr bei vollständig blanker Oberfläche auf folgende Werte ansteigen müssen:

Druckanstieg	Wassertemperatur	Diffusionskonstante	Nach Versuch von
210 mm Hg = 100%	95° [1]	$27700 \cdot 10^{-5}$	Dällenbach
0,35 mm Hg = 0,17%	30° [2]	$50 \cdot 10^{-5}$	Brown Boveri
Beobachtet wurde aber:			
0,007 mm Hg = 0,0035%	30° [2]	$0{,}6 \cdot 10^{-5}$	Brown Boveri

[1]) Destilliertes Wasser.
[2]) Leitungswasser.

Damit ist der praktische Beweis erbracht, dass mit dem üblichen Kühlwasser und mit Temperaturen unter 60° C die H-Diffusion minimal ist, selbst für blanke Kühloberflächen, und dass bei Anwendung des normalen gesunden Rostschutzanstriches auch noch nach 10 Jahren eine vollkommene Dichtigkeit gegen Wasserstoff besteht. Die von Herrn Dr. Dällenbach an blanken Eisenröhren in destilliertem Wasser festgestellte, an sich sehr interessante Erscheinung ist für unsere Mutatoren aus Eisen mit Pumpe ohne praktische Bedeutung. Das wird auch durch unsere sehr günstigen Betriebserfahrungen an einigen tausend Mutatoren nur bestätigt. In der ETZ vom 25. Januar 1934, S. 88, wird nämlich der in den Mutator eindringende Wasserstoff für einen Teil der Rückzündungen verantwortlich gemacht. Ohne auf die Erklärungen über die Aufnahme und Abgabe des Wasserstoffes besonders durch die Anoden und diese Rückzündungsursache näher einzutreten (wir sind über diesen Punkt verschiedener Meinung[1])) müssen wir betonen, dass unsere Beobachtungen und Erfahrungen den Annahmen von Herrn Dr. Dällenbach widersprechen. Dies gilt für alle Zylinderleistungen bis ca. 5500 kW und alle möglichen Belastungsarten, wie ununterbrochener Dauerbetrieb über Monate, oder kurzdauernde hohe Spitzenlasten und abwechselnd wochenlanger Dauerbetrieb mit anschliessenden monatelangen Betriebspausen.

Zu dem zugeschweissten Mutator ohne Pumpe ist ergänzend noch zu sagen: Bei den bescheidenen Leistungen des kleinsten Metalltyps für z. B. 600 A, 360 kW, lässt sich wohl verstehen, dass ein einigermassen sicherer Betrieb möglich erscheint. Vor einer ganz anderen Situation steht man aber bei den mittleren und grossen Typen mit mehr als 15facher Leistung, bestimmt für die verschiedensten Belastungsarten, wie schon oben angegeben. Selbst wenn ein Mutator an sich vollkommen jeder zulässigen normalen Dauer- und Ueberlast gewachsen wäre, kann es durch fehlerhafte Betriebsführung und Ueberwachung vorkommen, dass im Innern Ueberbeanspruchungen entstehen, die eine Ueberholung des Apparates nötig machen. Der Betriebsleiter steht dann vor der Tatsache, den Mutator nicht an Ort und Stelle reparieren zu können. Er muss ihn in die Fabrik schicken, denn nur dort sind die nötigen, teuren Spezialeinrichtungen (Heizöfen mit mehreren m³ Inhalt für 500° C und Pumpeneinrichtungen) vorhanden. Was das heisst, wenn die Anlage in Australien, Südafrika oder China ist, kann jeder ermessen. Ausserdem kann nur der Spezialist diese Mutatoren behandeln, während beim Mutator mit Pumpe jeder Arbeiter leicht lernt, wie auch eine grössere Ueberholung durchzuführen ist, ohne auf umfangreiche, teure Einrichtungen angewiesen zu sein. Aber auch beim kleinsten Metallmutator muss es für den Betriebsmann eigentlich sehr unangenehm sein, bei Störungen immer mit der Fabrik rechnen zu müssen. Beim Glasmutator ist es ganz anders, hier kennt man als Lösung nur den Ersatzkolben, weil eine Reparatur nicht möglich ist. Wollte man beim abgeschlossenen Metallmutator auch so vorgehen, dann müsste immer ein Reservezylinder vorhanden sein, was besonders bei Anlagen mit grossen Gefässen recht teuer ist. Die Praxis fordert deshalb unzweideutig, dass Mutatoren, die mittlere und grössere Leistungen umformen, an Ort und Stelle auch durch die Betriebsinhaber reparierbar sein müssen; deshalb sind die Pumpen nötig. Bei den kleinsten Metallmutatoren scheint eine wirtschaftliche Lösung ohne Pumpe möglich, doch bleibt bei Störungen die dauernde Abhängigkeit des Betriebsleiters von der Fabrik bestehen.

Herr **Dr. Dällenbach** nimmt dazu folgendermassen Stellung:

Aus den Aeusserungen des Herrn Gaudenzi geht hervor, dass die Firma Brown, Boveri die Erscheinung der Wasserstoffdiffusion durch Eisenwandungen nachträglich auch bestätigt gefunden hat. Herr Gaudenzi misst aber dieser Erscheinung keine praktische Bedeutung bei, da bei Erniedrigen der Temperatur (auf 60°, bzw. 20°) die diffundierende Menge stark absinke und durch Aufbringen eines Rostschutzanstriches weiter vermindert werden könne. Auf beide Einflüsse, sowohl der Temperatur als auch der Oberflächenbeschaffenheit, wurde in meiner ersten Veröffentlichung «Grossgleichrichter ohne Vakuumpumpe», erschienen in der ETZ, Bd. 55 (1934), S. 85, ausdrücklich aufmerksam gemacht.

In Fig. 1 sind zwei Messreihen, welche wir seinerzeit über die Temperaturabhängigkeit der Wasserstoffdiffusion durch Eisenwandungen aufgenommen haben, durch Kreise, bzw. Kreuze, die Messwerte von BBC (Brown, Boveri-Mitt. Januar/Februar 1934, S. 85) dagegen durch Quadrate dar-

[1]) Siehe Brown-Boveri-Mitt. 1935, Nr. 1/2, S. 63.

gestellt. Die ausgezogene Kurve veranschaulicht die dem Landolt-Börnstein entnommene Temperaturabhängigkeit der Wasserstoffionen-Konzentration in destilliertem Wasser. Sowohl unsere als auch die BBC-Werte sind in Maßstäben aufgetragen, dass die Punkte für 90° C auf die ausgezogene Kurve zu liegen kommen, um die Unterschiede in der Temperaturabhängigkeit möglichst klar hervortreten zu lassen. Unsere Messwerte befolgen angenähert dieselbe Temperaturabhängigkeit wie die dem Landolt-Börnstein entnommene Wasserstoffionen-Konzentration in destilliertem Wasser. Die BBC-Werte für 60° und 20° dagegen liegen viel tiefer. Woher das kommt, entzieht sich meiner Beurteilung. Ich bin gerne bereit, über alle Einzelheiten unserer Versuche an Hand ausführlicher Versuchsprotokolle Auskunft zu geben.

Gestützt auf wenige Messpunkte spricht nun Herr Gaudenzi in seinem Votum unserem viel reicheren und von seinen Ergebnissen abweichenden Beobachtungsmaterial (Fig. 1) erneut die praktische Bedeutung ab. Ich beschränke mich darauf, die folgenden Gründe anzugeben, welche *für* die praktische Bedeutung der Wasserstoffdiffusion sprechen.

1. Je niedriger die Temperatur des Gleichrichters, um so niedriger die Wasserstoffdiffusion, um so niedriger aber auch die Ueberlastbarkeit (Grenzstrom) des Apparates (vgl. mein vorausgehendes Referat). Es gibt Firmen, welche mit Rücksicht auf hohe Ueberlastbarkeit des Apparates hohe Betriebstemperaturen, über 90° C, anwenden.

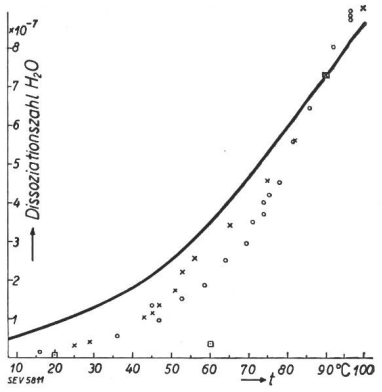

Fig. 1.

2. Es sind zahlreiche Grossgleichrichteranlagen ohne Rostschutz in Betrieb. Erst meine Veröffentlichung (ETZ, Bd. 55 [1934], S. 85) hat zum erstenmal auf den unerwarteten Zusammenhang zwischen Rostschutz und Vakuumhaltung hingewiesen.

3. Pumpenloser Betrieb von Grossgleichrichtern lässt sich nur erreichen, wenn die von mir angegebenen Massnahmen beachtet werden, nämlich:

a) ein Kühlmedium, welches keine freien Wasserstoffionen enthält, oder

b) ein Wandmaterial, welches keine Wasserstoffionen aufnimmt, oder

c) ein dichter Ueberzug der Wand mit einem Material, welches keine Wasserstoffionen aufnimmt.

Herr Gaudenzi führt aus, dass ein normaler Mutator selbst mit blanker, wasserbenetzter Aussenoberfläche von der von BBC gemessenen, sehr geringen Wasserstoffdiffusion nichts Nachteiliges merke, weil die Vakuumpumpe hoher Saugleistung das wenige eindringende H-Gas sofort wegschaffe, und erwähnt Beobachtungen an einem bei 30° C mittlerer Gefässtemperatur im Betrieb befindlichen Grossgleichrichter, dessen Restgasdruck im Zylinder in einem Jahr bei vollständig blanker Oberfläche auf die von Herrn Gaudenzi in der Tabelle angegebenen Werte hätte ansteigen müssen.

Diesen Behauptungen liegt die irrige Auffassung zugrunde, der Wasserstoff könne sich auch bei in Betrieb befindlichem Zylinder im Entladungsraum anreichern und das Vakuum verschlechtern. Ich habe bereits in meiner ersten Veröffentlichung betont:

«Diese Gasabgabe macht sich allerdings so lange nicht bemerkbar, wie der Lichtbogen brennt, dagegen wird sofort nach Abschalten des Lichtbogens eine um so grössere Gasmenge frei, je längere Zeit das Gleichrichtergefäss sich seit dem letzten Pumpen in Betrieb befunden hat.»

«Diese Diffusion von Wasserstoff ins Innere des Vakuumgefässes macht sich, solange der Lichtbogen brennt, am Vakuummeter nicht bemerkbar, indem der von den Wandungen abgegebene und zu Molekülen rekombinierte Wasserstoff durch den Lichtbogen wieder in Ionen umgewandelt und in die Metallwandungen und Elektroden zurückgetrieben wird.»

Herr Gaudenzi geht also in der von ihm angegebenen Tabelle von falschen Voraussetzungen aus. Der Wasserstoff kann sich gar nicht im Vakuum anreichern, sondern wird in die Wände und Elektroden hineingetrieben und führt im Innern der Wände und Elektroden zu Gasaufladungen von viel grösserer Konzentration als bei Austritt ins Vakuum. Die Vakuumpumpe hat also, solange der Lichtbogen brennt, keine Möglichkeit, den Wasserstoff wegzuschaffen, um so mehr, als bei gutem Vakuum und automatischer Ueberwachung des Restgasdruckes die Pumpanlage ausser Betrieb bleibt.

Aus dem letzten Abschnitt der Ausführungen von Herrn Gaudenzi muss entnommen werden, dass die Gleichrichter im praktischen Betrieb Störungen zeigen, die ein gelegentliches Ueberholen nötig machen. Ob diese Störungen auf die fehlerhafte Bedienung durch den Kunden — der dann anderseits ohne Spezialkenntnisse und ohne Spezialeinrichtungen auch grössere Ueberholungen selber soll durchführen können, wie Herr Gaudenzi annimmt — zurückzuführen seien, bleibe dahingestellt. Dagegen können folgende Gründe für Betriebsstörungen angegeben werden:

1. Korrodierende Wirkung des Kühlwassers.
2. Ueberspannungen und Rückzündungen bei Ueberlast oder bei Betrieb mit kaltem Zylinder.
3. Verschmutzen und Verschlammen des Quecksilbers infolge schlechten Vakuums.
4. Schlechtes Vakuum infolge Fehlanzeige des Hitzdrahtvakuummeters oder Versagens der Vakuumpumpe, bzw. ihrer Automatik.
5. Störungen am Hahn in der Hochvakuumleitung.
6. Rückzündungen infolge Aufladung der Elektroden mit Wasserstoff.

Herr Gaudenzi scheint der Ansicht zu sein, dass alle diese Störungsmöglichkeiten nicht mehr bestehen und höchstens «fehlerhafte Betriebsführung und Ueberwachung» Ueberholungen und damit die Vakuumpumpanlage nötig machen. Ich begnüge mich in diesem Zusammenhang, auf die zahllosen Patente hinzuweisen, zu denen sich jedes Jahr neue gesellen, welche gegen die erwähnten Störungsmöglichkeiten Abhilfen vorschlagen. Sind diese Störungsmöglichkeiten vorhanden und sind die Gleichrichter gegen Fehler in der Wartung empfindlich, so kann man allerdings nicht riskieren, die Vakuumpumpe wegzulassen. Es gibt aber einen Weg, die sämtlichen angeführten Störungen mit Sicherheit auszuschliessen und Apparate herzustellen, welche ausser dem alljährlich einmaligen Schmieren des Ventilatormotors keine Wartung benötigen. Diesen Weg habe ich mit meiner Gleichrichterkonstruktion eingeschlagen, nämlich die von den Glühlampen und den Radioröhren her bekannte Vakuumtechnik auf die grossen Leistungen zu übertragen. Glühlampen und Radioröhren waren ursprünglich sehr unzuverlässige und launische Objekte, und erst, als es gelang, vollkommen dichte Stromeinführungen herzustellen und hochwertige Evakuierungsmethoden anzuwenden, ergaben sich die modernen, in ihren Leistungen gleichmässigen Fabrikate, denen z. B. im Sicherheits- und Nachrichtenwesen verantwortungsvolle Aufgaben anvertraut werden. Man muss erwarten, dass die Anwendung eben dieser Herstellungsmethoden auf dem Gebiete der Grossgleichrichter entsprechende Fortschritte zeitigt.

Zum Schluss noch folgendes: Ich teile vorläufig auch die Bedenken von Herrn Gaudenzi, ganz grosse Gleichrichter ohne Vakuumpumpe herzustellen. Aber vielleicht sind an Stelle davon zwei oder drei kleinere pumpenlose Gross-

gleichrichter einfacher, zuverlässiger und auch billiger als ein einziger Mammutzylinder mit 24 Anoden und zwei Vakuumpumpanlagen. Es gibt sicher viele Betriebsleiter, welche einem einzigen derartigen Zylinder mehrere pumpenlose Grossgleichrichter kleinerer Leistung vorziehen, ähnlich wie es heute Kunden gibt, die gegenüber einem Grossgleichrichter mit Vakuumpumpe mehrere Glaskolben kleinerer Leistung bevorzugen. Dass bei einer derartigen Unterteilung der ganz grossen Leistungen, die übrigens seit einigen Jahren auch für Gleichrichter mit Vakuumpumpe eingesetzt hat, die Bedenken des Herrn Gaudenzi bezüglich Lagerhaltung von Ersatzkolben verschwinden, ist selbstverständlich.

Referat

von

Herrn Dr. Ing. *Alfred Siemens*, Ingenieur der Siemens-Schuckert-Werke, Berlin,

über

Fortschritte und Erfahrungen im Stromrichterbau.[1])

Es wird besonders die konstruktive und technologische Seite des Stromrichterbaus unter Berücksichtigung der verschiedenen Typen behandelt, wobei die wärmetechnischen und dielektrischen Fragen im Vordergrund stehen. Es wird auf die Abgrenzung des Anwendungsgebietes von Eisen- und Glas-Stromrichtern eingegangen.

L'auteur examine surtout le côté constructif et technologique des redresseurs et onduleurs, en tenant compte des différents types; les questions touchant à l'échauffement et à la rigidité diélectrique occupent une place prépondérante dans cet exposé, qui se termine par une délimitation du champ d'application des redresseurs à cuve métallique d'une part et de ceux à ampoule de verre d'autre part.

In einem kurzen Ueberblick lassen sich die Erfahrungen und Fortschritte im Stromrichterbau nach folgenden Gesichtspunkten zusammenfassen:

Man beschäftigte sich in den letzten Jahren zunächst damit, die Steuerfähigkeit der Stromrichter jeder Art zu untersuchen, wobei die Schwierigkeiten erwartungsgemäss mit der Grösse der zu steuernden Apparate zunahmen. Anschliessend hieran waren die Hochstromapparate für die hohen Beanspruchungen bei gleichmässiger, insbesondere chemischer Dauerlast durchzubilden, deren Folgeerscheinungen in ihrer Eigenart kennzeichnend für die Vakuumtechnik sind. Es handelt sich im wesentlichen um Werkstoff- und Fertigungsfragen, die hierbei auftreten und auf deren Verfolgung und Anwendung zum guten Teil die Fortschritte im Stromrichterbau beruhen. Weiter erforderten Aufgaben, die sich durch die Ausbreitung von Senderbetrieben ergaben, eine Anpassung an dieses recht ausgedehnte Sondergebiet, und man baute Hochspannungsstromrichter mit Quecksilber- und Glühkathoden, bei denen auch wieder die Beherrschung des Werkstoffes neben den Erkenntnissen der Gasentladungstechnik zum Erfolg führte. Eine besondere Beachtung fand schliesslich noch das Gebiet der mittleren Ströme, vor allem das Grenzgebiet zwischen Eisen- und Glasstromrichtern, in dem man sich Klarheit über die besten Ausführungsformen verschaffte, und schliesslich die Arbeiten am pumpenlosen Eisenstromrichter, bei dem wieder die Werkstoff-Fragen im Vordergrund stehen. Der augenblickliche Entwicklungsstand lässt sich dahingehend kennzeichnen, dass man auf Grund von praktischen Erfahrungen und von wissenschaftlichen Untersuchungen sich einen solchen Ueberblick über die Grundgesetze geschaffen hat, dass man einmal ein gewisses Gefühl für neue Formgebungsmöglichkeiten mit dem Ziel höherer Ausnutzung bekommen hat, und dass man zum andern durch eingehende Beschäftigung mit den Werkstoff-Fragen den bei höherer Ausnutzung auftretenden höheren Beanspruchungen gewachsen ist.

Im einzelnen seien nun einige Beispiele für die Arbeiten angegeben: Die Untersuchung der Steuerfähigkeit läuft im wesentlichen darauf hinaus, einen Maßstab für die Wirksamkeit der Steuergitter bei hohen Beanspruchungen schon während der Prüffeldprobe zu bekommen. Neben Dauerversuchen mit niedriger Aussteuerung, die für das Netzhochfahren wichtig sind, geben Kurzschlussabschaltversuche einen guten Aufschluss. Trotz der bei Kurzschlüssen auftretenden starken Ionisierung dürfen

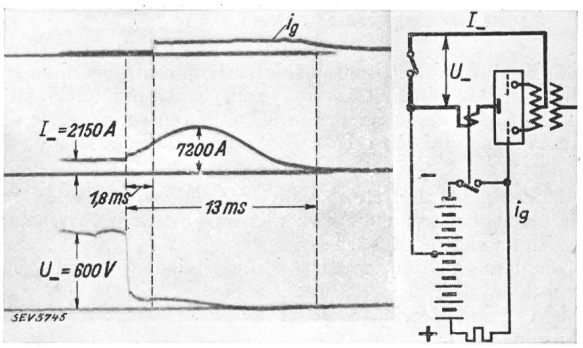

Fig. 1.
Stromrichter, 5000 A, 600 V.
Oszillogramm einer Kurzschlussabschaltung.

die negativ beaufschlagten Gitter eine Zündung, bzw. Wiederzündung der einzelnen Anoden nicht zulassen. Die negative Spannung wird abhängig vom Kurzschlußstrom in bekannter Weise über geeignet bemessene Vorwiderstände mit Schnellrelais an die Gitter gelegt. In Fig. 1 ist ein Oszillogramm einer Kurzschlussabschaltung gezeigt, bei der die gerade brennende Anode ausbrennt und weitere Anoden nicht zünden, so dass nur ein geringer Anstieg des Kurzschlußstromes stattfindet. Die Gitterform, mit der man einen ähnlich kurzen Verlauf am sichersten erreicht, ist demnach als die günstigste zu bezeichnen. Die gesamte Apparatur von tech-

[1]) Auf ausdrücklichen Wunsch des Autors «Stromrichter» statt «Mutator», siehe Einleitung, Seite 585.

nisch ausgeführten Kurzschlussabschalteinrichtungen unter Verwendung eines Schnellrelais zeigt Fig. 2, während Fig. 3 eine vollständige Steuereinrichtung und Kurzschlussabschaltung durch drei gittergesteuerte Hilfsentladungsgefässe angibt. Das eine Gefäss liefert die Zünd- und Sperrspannung, das zweite erzeugt die durch Transformatoren an die Hauptgitter gegebenen Steuerimpulse, mittels des dritten wird bei Kurzschluss trägheitslos die negative Sperrspannung angelegt.

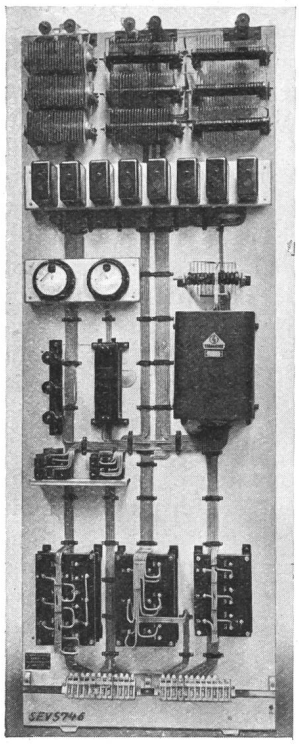

Fig. 2.
Kurzschlusslöscheinrichtung f. Stromrichter, 5000 A, 800 V.

Die Erkenntnis, die sich für die bauliche Ausführung aus den Versuchen ergibt, ist die, mehrere möglichst engmaschige Gitter nahe am Anodenkopf im Anodenschutzrohr einzubauen. Ausserdem ist es möglich, wie eine in Kürze erscheinende Arbeit von Spenke und

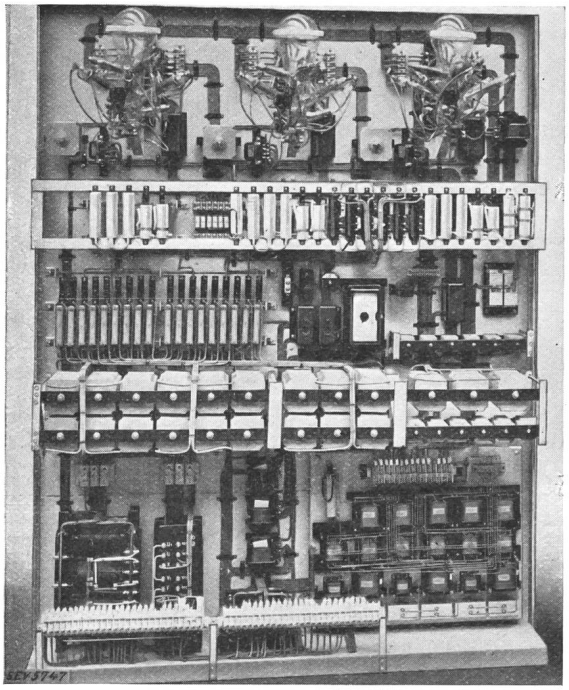

Fig. 3.
Steuereinrichtung mit Hilfsgefässen für Stromrichter bis 5000 A, 800 V.

Steenbeck zeigen wird, die günstigsten Gitterformen zu berechnen. Diese liegen dann vor, wenn die Gitterstege wie die Knotenlinien einer in einer Oberschwingung erregten Membran angeordnet werden. Es entstehen dann in den einzelnen brennenden Lichtbogenfäden gleiche Längsfeldstärken, die für eine gleichmässige Verteilung der Säule über den Rohrquerschnitt nötig sind. Man ist jedoch in der Anordnung der Gitter nicht frei, weil man beachten muss, dass die durch sie erzeugte Erhöhung des Brennspannungsgradienten und die dadurch auftretende Wärmeanhäufung bei Dauerbeanspruchungen mit Hochstrom schädlich wirken kann. Es musste nun die Arbeit einsetzen, durch geeignete Werkstoffauswahl in Verbindung mit der richtigen Formgebung die in jeder Beziehung bestmöglichen Verhältnisse zu bekommen.

Diese Arbeiten erstreckten sich naturgemäss nicht nur auf die Gitter selber, sondern auf die ganze Anode, die in allen ihren Teilen elektrisch,

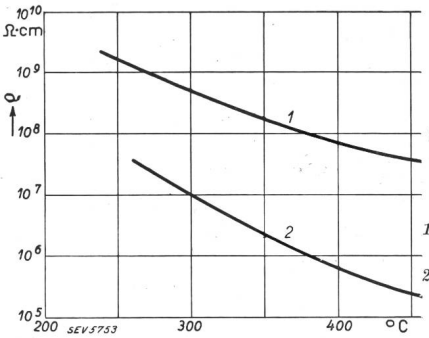

Fig. 4.
Widerstandskurven von keramischem Isolierwerkstoff.
Spezifischer Widerstand (Ω cm) in Funktion der Temperatur (°C)
1 Vor Betriebsbeanspruchung.
2 Nach Betriebsbeanspruchung.

thermisch und mechanisch hoch beansprucht ist. Wärmestauungen sind, wie bereits angedeutet, in allen Teilen peinlichst zu vermeiden. Die Isolierwerkstoffe dürfen sich nicht verändern. Die Kriechwege von Anoden- und Gitterisolatoren müssen dauernd erhalten bleiben, und schliesslich sind die Berührungsstellen von Eisen und Keramik so durchzubilden, dass durch die verschiedenen Eigenschaften in bezug auf Wärmeausdehnung und Wärmeleitfähigkeit keine Schwierigkeiten entstehen. Wie stark ein ungeeigneter Isolierwerkstoff seine Eigenschaften im Dauerbetrieb ändern kann, zeigt Fig. 4, in dem die Widerstandskennlinien vor und nach der Dauerbeanspruchung wiedergegeben sind. Unter Berücksichtigung der verschiedenartigen, z. T. widersprechenden Forderungen, ergab sich der Gesamtaufbau eines Hochstromgleichrichters, der zwar in seinen äusseren Formen nach bekannten Grundsätzen ausgeführt ist, dessen Anoden jedoch die Berücksichtigung der angedeuteten Forderungen zeigen (Fig. 5), die im Grunde und in erster Linie thermischer Natur sind.

Bei der nächsten Gruppe von Stromrichtern, die für Hochspannung, insbesondere Sendebetrieb, mit vergleichsweise kleinen Strömen zu bauen waren, treten rein wärmetechnische Fragen zunächst in den Hintergrund, und es handelt sich bei ihrem Aufbau mehr darum, durch Beherrschung der elektrischen Felder und der sogenannten Wandladungen bei kleinen Abmessungen auf beste Spannungssicherheit zu kommen, ohne die Eigenschaften guter Steuer-

fähigkeit zu verlieren. Zu der in Fig. 6 angegebenen Form führten folgende Ueberlegungen: Bei den ersten Versuchen, Hochspannung mit Glasstromrichtern zu erzeugen, war ein Erfolg in dem beabsichtigten Umfang nicht erzielt worden, trotzdem man beispiels-

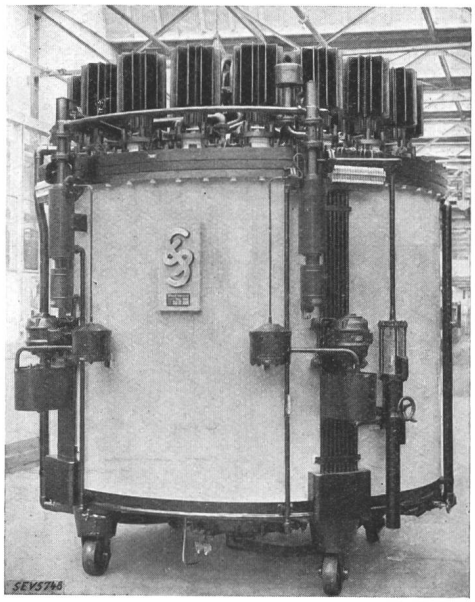

Fig. 5.
Gittergesteuerter Stromrichter, 5000 A, 800 V.

weise den Armen eine mehrfache Knickung gab. Es traten Wandladungen in derartig starkem Masse auf, dass Durchschläge durch die Glaswandungen trotz Anwendung aller möglichen metallischen Schirmanordnungen nicht zu vermeiden waren. Dies war nur durch den ungünstigen Verlauf der Feldlinien

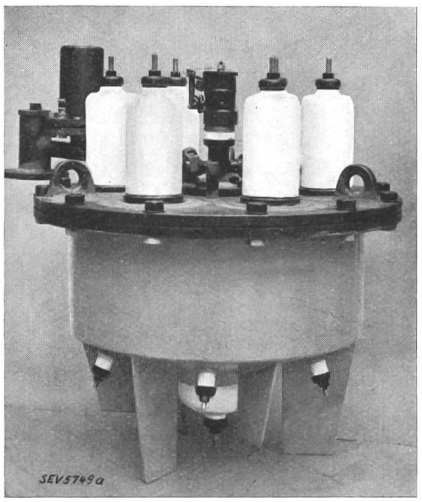

Fig. 6.
Gittergesteuerter Hochspannungs-Stromrichter für Sender 40 A, 12 kV, mit Luftkühlung; Vakuum-Kessel.

zwischen gesperrten Anoden und Kathode, bzw. nicht gesperrten Anoden und brennender Anode zu erklären, die die Glaswände mehrfach schneiden mussten und hierbei durch starke Feldsprünge eine zum Durchschlag führende Ionenanhäufung verursachten. Durch Vergleichmässigung des Feldes in Verbindung mit der Auswahl von günstigeren Werkstoffen mussten diese Schwierigkeiten beseitigt werden können. Die Anordnung war so zu treffen, dass die Feldlinien Anode-Kathode möglichst homogen ohne Durchdringung von Wandungen verlaufen und diese Entfernung klein gegenüber der Entfernung zwischen nicht brennender und brennender Anode ist. Es wurden also sämtliche Kathodenpotential führenden Teile, d. h. der Vakuumkessel aus Eisen und die Gitter als einheitlicher Körper aufgefasst und die Gitter in Höhe des Deckels gelegt, dem die Anoden in geometrisch möglichst einfacher Art gegenübergestellt und ausserhalb des Kessels in glockenförmigen Porzellanschutzrohren untergebracht wurden. Tatsächlich konnten auf diesem Wege ausgezeichnete Erfolge erzielt werden, mit spezifischen Ausnützungen der Stromrichter, wie sie bis dahin nicht erreicht waren.

Auch hierbei kam eine neuartige Werkstoffbehandlung einer weitgehenden Ausführungsmöglichkeit der angestellten Ueberlegungen sehr zustatten. Durch Anwendung eines Weichlötungsverfahrens zwischen Porzellan und Eisen wurde eine Vakuumdichtung erzielt, die ohne vorspringende Teile feldmässig günstig war, die Anwendung neuartig geformter Porzellane zuliess und ausserdem die Erzielung allerbesten Vakuums ermöglichte. Durch weitere Verfolgung dieser Technik gelang es dann auch, einen nach den gleichen Gesichtspunkten aufgebauten Hochspannungsstromrichter ganz aus Porzellan herzustellen (Fig. 7), der auch bereits im Dauerbetrieb die Richtigkeit des eingeschlagenen Weges bestätigt hat. Die Steuerung und Kurzschlussabschaltung des Hochspannungsstromrichters ist ohne weiteres möglich und bietet wegen der verhältnismässig geringen Ionisation keine nennenswerten Schwierigkeiten.

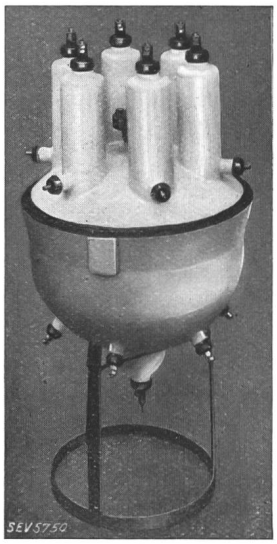

Fig. 7.
Keramik-Metall-Verschmelzungen, vakuumdicht verlöteter Ganzporzellanstromrichter, 15 A, 13 kV.

Es sei der Vollständigkeit halber noch erwähnt, dass es in allerneuester Zeit gelungen ist, auf Grund der gesammelten Erfahrungen auch Glasgefässe mit Quecksilberkathode für Spannungen bis 15 000 V und Strömen bis zu 20 A zu bauen (Fig. 8).

Für viele Zwecke, insbesondere für hohe Spannungen kommen auch gesteuerte und ungesteuerte Stromrichter mit Glühkathoden zur Verwendung, die meist einanodig in Röhrenform gebaut werden und sich aus diesem Grunde besser für eine maschinelle Reihenfertigung eignen. Die Vorteile ihrer Anwen-

dung liegen darin, dass sich die Dampfdruckverhältnisse durch geeignete Wahl der Bauform eindeutig festlegen lassen und dass dementsprechend bei den gesteuerten Ausführungen die Steuergenauigkeit grösser ist. Auch bei diesen Ausführungen ist darauf zu sehen, möglichst homogene Felder zwischen Anode und Kathode zu bekommen und Wandladungen zu vermeiden. Die Entfernung Anode-Kathode wird so gering gewählt, dass man entsprechend dem Paschenschen Gesetz auf die nötigen, hohen Durchschlagfestigkeiten kommt. Die Form der Elektroden lässt keine Streulinien zu, die die Glaswandungen treffen könnten. Bei einem ungesteuerten Gleichrichter kann die Lichtbogenstrecke ohne besondere Abdeckung verbleiben. Bei einem gesteuerten Gleichrichter jedoch muss man für eine geeignete Abschirmung Sorge tragen, um zu verhindern, dass während des gesperrten Teiles der positiven Halbwelle die von der Kathode dauernd ausgesandten Elektronen die Strecke Anode-Gitter ionisieren, d. h. eine Durchzündung verursachen. Vorteilhaft ist es, diese Schirme in Staffeln anzuordnen, die sich kapazitiv gegeneinander aufladen und dadurch das Potentialgefälle unterteilen.

In dem Aufbau der gesamten Stromrichter war bisher das Grenzgebiet zwischen den Ausführungen aus Glas und denen aus Eisen noch nicht ganz klar umrissen und man hatte noch keinen rechten Ueberblick, welche Bauart man für die Ströme zwischen 500 und 1000 A liefern sollte. Die obere wirtschaftliche, leistungsmässige und herstellungstechnische Grenze der Glasgefässe musste festgestellt werden; anderseits waren die Bauformen an der untern Grenze der Eisengefässe dem Gesamtaufwand nach zu vereinfachen.

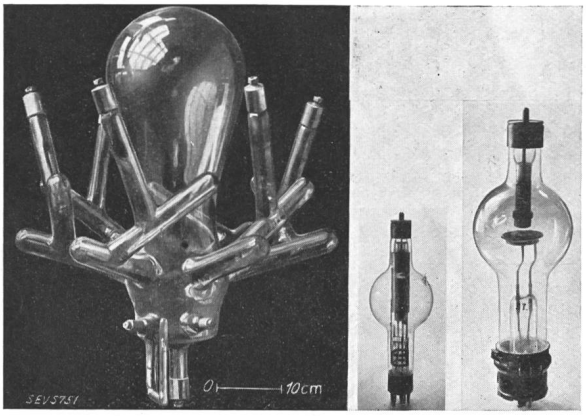

Fig. 8.
Glasgefässe für Hochspannungsstromrichter.

Die Untersuchungen an den Glasgefässen erstreckten sich in zweierlei Richtung dahingehend, ob durch besondere Formgebung noch wesentliche Mehrleistung zu erzielen war, und ferner, welchen Einfluss die Luftgeschwindigkeit auf die Leistungsfähigkeit hat. Zweckmässigerweise sollte man bei Glasgefässen nach dem augenblicklichen Stande der Erkenntnis nicht über Ströme von 500 A pro Einheit hinausgehen, wenn man auch in der Lage ist, wie weiter unten gezeigt werden wird, Ströme von 700 A, ja über 1000 A zu beherrschen. Das Blasen eines solchen Gefässes von etwa 1 m Höhe und 0,5 m Kolbendurchmesser erfordert einen derartigen physischen Aufwand des Glasbläsers, der durch Maschinen nicht ersetzbar ist, dass man die Grenzen der menschlichen Leistungsfähigkeit erreicht hat. Die Wärmestrahlung der grossen Kolben bei der Bearbeitung mit dem Gebläse ist kaum mehr erträglich.

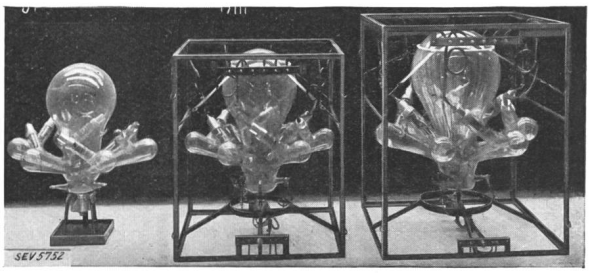

Fig. 9.
Glas-Stromrichterkolben, 600 V.

Besondere Vorteile durch Abänderung der bekannten Kolben- und Armformen waren nicht zu erkennen, so dass man also Ausführungen nach Fig. 9 als günstigste Ausführungsformen ansehen muss.

Einen wesentlichen Einfluss auf die erzielbare Leistung hat die Geschwindigkeit der Kühlluft. Durch Rückstrommessungen kann man gerade bei Glasgefässen die verschiedenen Einflüsse recht gut erkennen. Setzt man einen bestimmten Rückstromwert, etwa 1,5 mA, als für Dauerbetrieb zulässigen Grenzwert an, so ergibt sich die Leistungskurve des grössten Kolbens nach Fig. 10. Man sieht daraus, dass Ströme von 700 A bei 550 V ohne weiteres erreicht wurden. Der dabei benötigte Aufwand von Luftführungen und Lüftern ist jedoch schon recht unbequem; dazu spielt die Lärmfrage bei diesen Luftgeschwindigkeiten eine erhebliche Rolle, so dass

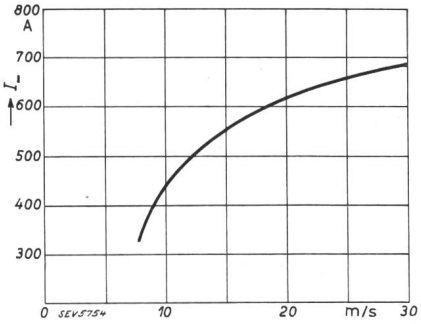

Fig. 10.
Belastung eines Glasstromrichters, abhängig von der Kühlung. Gleichstrom (A) in Funktion der Luftgeschwindigkeit (m/s).

es — auch mit Rücksicht auf die Werkstoffeigenschaften des Glases — vorteilhaft erschien, sich nach einfacheren Lösungsmöglichkeiten umzusehen, und die Entwicklung von Glasgefässen über Einheiten für rund 500 A, 600 V bei sehr guter Ueberlastungsfähigkeit nicht hinauszutreiben.

Neue Wege sind beschritten worden durch Vereinfachung der Bauformen und Erhöhung der Aus-

nutzung von Eisenmutatoren zur Herabsetzung der wettbewerbsfähigen unteren Grenzleistung der bisherigen Typenreihe. Es gelang unter Berücksichtigung der thermodynamischen, thermischen und

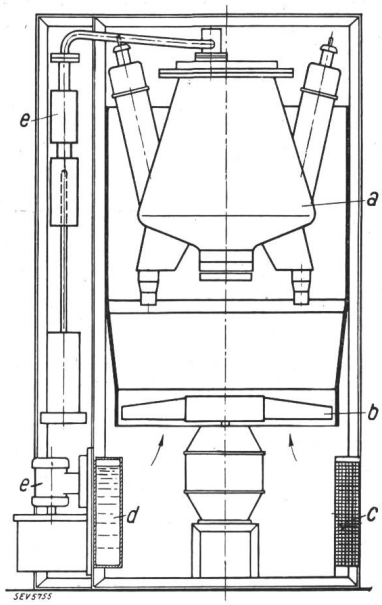

Fig. 11.

Luftgekühlter Eisenstromrichter, 800 A, 800 V.

a Vakuumgefäss.
b Lüfter.
c Rückkühler.
d Ausgleichbehälter.
e Vakuumpumpe.

physikalischen Grundvorgänge (Dampfströmung, Wärmeverteilung und Gasentladung, in Verbindung mit aerodynamischen Ueberlegungen, günstigste Form für Luftkühlung und werkstattechnischen Neuerungen, Lötdichtung mit höheren zulässigen Temperaturen) einen Mittelstromtyp herzustellen, dessen spezifische Leistung gegenüber den bisherigen kleinen Eisenstromrichtern auf das Dreifache gesteigert werden konnte. Den Gesamtaufbau zeigt Fig. 11. In einem den Glasgleichrichteranlagen ähnlichen Gerüst ist der Vakuumkessel, der Lüfter und die Pumpenapparatur untergebracht; an dem Gerüst werden zugleich Steuer- und Erregersatz angebaut. Man bekommt damit eine recht leistungsfähige Eisenstromrichtereinheit zunächst für rund 800 A, 800 V in dem von Glasstromrichtern bekannten und bewährten Schalttafelaufbau.

Es liegt auf der Hand, dass man bestrebt ist, bei Eisenstromrichtern dieser Art auch noch die Pumpeinrichtung wegfallen zu lassen, trotzdem sie infolge ihrer in vielen Jahren erprobten Betriebssicherheit für das erwähnte Leistungsgebiet mit Vorteil angewendet werden kann. Für die Arbeiten an pumpenlosen Eisengefässen liegen ausgedehnte Teilerfahrungen aus den Gebieten von Eisen- und Glasstromrichtern mit Quecksilberkathode, von Glühkathodenröhren mit Gas- und Dampffüllung und Hochvakuumröhren für Verstärker- und Sendezwecke vor, die eine gute Grundlage abgeben für das neuartige, reine Werkstoffproblem, das, seiner Art entsprechend, allerdings eine gewisse Dauer bis zur endgültigen, betriebssicheren Lösung und Bewährung beansprucht.

Diskussionsbeitrag

von Herrn Dr. *M. Wellauer*, Ingenieur der Maschinenfabrik Oerlikon.

Es wurde bereits die Frage der wirtschaftlichen Ausnutzung von Mutatoreinheiten aufgeworfen. Stellt man ab auf die im praktischen Betrieb erreichten Resultate, so macht man die Feststellung, dass der 6-Anoden-Mutator nur bis ca. 1200 A belastet wird, während anderseits beim 12-Anoden-Mutator bis zu 5000 A Belastung gegangen wird, d. h. beim 6-Anoden-Mutator bis 1200 A pro 6 Anoden, beim 12-Anoden-Mutator bis 2500 A pro 6 Anoden. Die Gestehungskosten eines Mutators werden nun durch dessen Durchmesser und vor allem durch die Zahl der Anoden bestimmt. Die Höhe des Mutators trägt relativ wenig zu dessen Kosten bei. Vergleichende Berechnungen ergeben, dass der Uebergang von 6 zu 12 Anoden mit einer 30- bis 40prozentigen Kostenerhöhung verbunden ist. Man hat daher ein Interesse, die Leistung, bzw. die Strombelastung des 6-Anodentyps möglichst heraufzusetzen. Wie ich bereits erwähnt habe, ist dies im allgemeinen bisher nicht gelungen.

Um die wirtschaftlichen und auch betriebstechnischen Vorteile der 6-Anoden-Mutatoren weitgehend auszunutzen, wendet die Maschinenfabrik Oerlikon bei diesen Typen eine Dampfführung an, die ich bereits vor einigen Jahren in einem Vortrag beschrieben habe [1]). Diese Dampfführung besteht darin, dass der Hg-Dampf durch einen Dampfführungsschirm, der sich zwischen der Kathode und dem Anodenraum befindet, seitlich abgelenkt und an den untern Kesselteilen kondensiert wird. Bei grösserem Strom, über 1400 A, wird die Kondensation durch eine Kühlschlange, die sich unterhalb des Dampfführungsschirmes befindet, verstärkt. Diese Konstruktion gestattet, den Anodenteilkreis so klein zu halten, dass bei geringem Kesseldurchmesser und 6 Anoden relativ sehr grosse Leistungen bewältigt werden können. Unsere Dampfführung hat im praktischen Betrieb, speziell auch bei hohen Spannungen, sehr gute Resultate ergeben und hat uns erlaubt, 6-Anoden-Mutatoren mit einem Total-

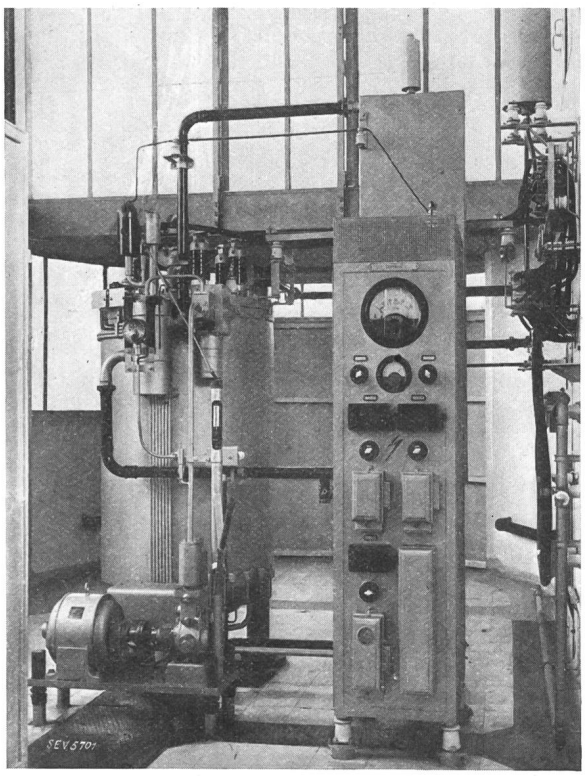

Fig. 1.
6-Anoden-Mutator (Oerlikon) der Holländischen Staatsbahnen für 1200 kW dauernd, 1800 kW während 2 Std., 6000 kW während 1 Min., bei 1500 V.

[1]) Bull. SEV 1932, S. 85.

durchmesser von 1000 mm für Ströme bis 2400 A bei 600 V zu bauen. Ein Mutator dieser Konstruktion befindet sich bei den holländischen Staatsbahnen seit über einem Jahr in anstandslosem Betrieb. Seine Nennlast bei 1500 V ist 800 A dauernd, 1200 A während 2 Stunden, 3200 A während 40 Sekunden und 4000 A während einer Sekunde. Trotz dieser sehr hohen Belastung bietet diese Konstruktion noch eine hohe Sicherheit, denn im Versuchslokal wurde dieser Typ bei 1500 V folgendermassen belastet: 2200 A dauernd und 4000 A während 5 Minuten, anschliessend an 2200 A in Abständen von 10 Minuten, Betriebstemperatur 30 bis 40° C.

Für Mutatoren über 2400 A dauernd müsste wegen des Lichtbogenabfalles der Anodendurchmesser so gross gemacht werden, dass es vorteilhafter ist, 12 Anoden anzuwenden. Dabei kommen wir zu Dauerströmen von 4800 A. Oberhalb dieses Stromes kommt der 18-Anodentyp zur Anwendung. Sämtliche Gleichrichter derselben spezifischen Belastung erhalten die gleichen Konstruktionselemente. Der Kathodendurchmesser bleibt bis 4800 A gleich und wird erst beim 18-Anoden-Typ vergrössert. Diese Uebersicht der MFO-Typen zeigt, dass sich heute die Konstruktion der Grossmutatoren gesetzmässig aufbaut. Die Zahl der Typen ist im Verhältnis zu andern Maschinen klein und der äussere und innere Aufbau äusserst einfach.

Fig. 1 zeigt einen 6-Anoden-Mutator in der Anlage Schiedam der holländischen Staatsbahnen.

Referat

von

Herrn *H. Loosli*, Signum A.-G., Wallisellen,

über

Resonanzzündung.

Es wird eine neue Zündungsvorrichtung für Quecksilberdampf-Mutatoren beschrieben, die, ohne Relais arbeitend, sehr rasch und zweckmässig wirkt. Der Zündkreis ist als Schwingungskreis ausgebildet, der mit der Frequenz des Wechselstroms in Resonanz ist, so dass er eine relativ grosse Energie aufzuspeichern vermag, die beim Zündvorgang frei wird und zur Verdampfung von so viel Quecksilber genügt, dass die Zündung auch bei tiefen Raumtemperaturen sofort erfolgt.

L'auteur décrit un nouveau dispositif d'allumage pour mutateurs à vapeur de mercure, dispositif qui agit rapidement et correctement sans l'aide de relais. Le circuit d'allumage est un circuit oscillant en résonnance avec la fréquence du courant alternatif, de sorte qu'il est susceptible d'accumuler une quantité relativement élevée d'énergie qui, libérée au moment de l'allumage, suffit pour évaporer une quantité de mercure telle que l'allumage se produit instantanément, même aux basses températures.

Im Rahmen des heutigen Diskussionsvortrages möchte ich kurz über eine neue Zündung von Quecksilbermutatoren mit flüssiger Kathode berichten. Bekanntlich benötigt der Quecksilbermutator mit flüssiger Kathode zur Einleitung des Gleichrichtervorganges eine sogenannte Zündung. Diese wird im allgemeinen dadurch erzeugt, dass man nach Einschaltung des Stromes die Quecksilberkathode für einen Augenblick mit einer Hilfsanode, welche Zünder genannt werden soll, zur Berührung bringt. Um diese Berührung herbeizuführen, wurde bei den ersten Mutatoranlagen der Kolben gekippt. Als jedoch die Kolben im Laufe der Zeit grössere Dimensionen annahmen, wurde die Kippzündung eine Gefahr für den Glaskolben.

An deren Stelle kam die sog. statische Zündung. Dieser Name ist im Grund genommen nicht ganz richtig, denn beim Zündvorgang tritt immer in irgendeiner Weise eine Bewegung ein. Der Name soll lediglich sagen, dass der Kolben beim Zünden seine Lage nicht ändert. Es würde zu weit führen, alle die verschiedenen Vorschläge für statische Zündungen einzeln aufzuführen. Ich will nur auf einige typische Vertreter verweisen und erwähne die Spritzzündung, dann die thermische, bzw. elektromagnetische Zündung, bei welcher der Zünder bewegt wird, und die Kontraktionszündung, auch Pintschzündung genannt. Alle diese Zündarten erfordern eine mehr oder weniger komplizierte elektrische Steuerung durch Relais.

Eine zuverlässig wirkende Zündmethode soll folgende Bedingungen erfüllen:

1. Vollständige Betriebssicherheit.
2. Im Moment der Zündung muss eine genügend grosse elektrische Leistung zur Verfügung stehen, damit auch bei niedriger Raumtemperatur der Mutator in möglichst kurzer Zeit zündet.
3. Sichere Verhütung des Eintrittes der Hochleistung in den Erregerkreis bei einer falschen Zündung, was besonders bei Mutatoren mit hoher Spannung und Leistung wichtig ist.
4. Einfache und selbsttätig wirkende Schaltung unter möglichster Umgehung von Relais.

Fig. 1 zeigt die Schaltung einer thermischen Zündung, die bis vor kurzem von der Signum A.-G. verwendet wurde. Es sind nur die Erregeranoden (EA) eingezeichnet und der Zünder (ZA). Ein Transformator von 2×50 V liefert den Strom für die Erregeranoden. Der Zünder wird bewegt durch den Heizdraht H, indem bei eingeschaltetem Transformator von der 30 V-Wicklung ein Strom durch den Draht fliesst und diesen erwärmt, wodurch sich der Draht ausdehnt und der Zünder sich senkt bis zur Berührung mit der Quecksilberkathode. In diesem Moment fliesst ein Strom von der Sekundärwicklung über den Zünder zum Quecksilber durch die Kathodendrosselspule D, die beiden Relais 1 und 2, welche verschiedene Ampèrewindungszahlen haben, zum Mittelpunkt des Transformators. Das Relais 1 mit der höheren Ampèrewindungszahl zieht seinen Anker an, der Stromkreis für den Heizdraht wird unterbrochen. Dieser kühlt sich nun ab und der Zünder wird hochgezogen. Beim Verlassen des Quecksilbers entsteht dann der bekannte Zündfunken und der Erregerlichtbogen über die beiden Erregerelektroden EA setzt ein. Da dieser Strom wesentlich grösser ist als der vorhergehende, zieht auch das Relais 2 an

und der Zünder ist jetzt vollständig abgeschaltet. Diese Zündung hat, auch wenn sie etwas kompliziert ist, stets sicher und zuverlässig gearbeitet. Die Betriebssicherheit hing ausschliesslich von dem zuverlässigen Arbeiten der Relais ab. Ihr einziger Nachteil bestand darin, dass die Zündung etwas langsam arbeitete.

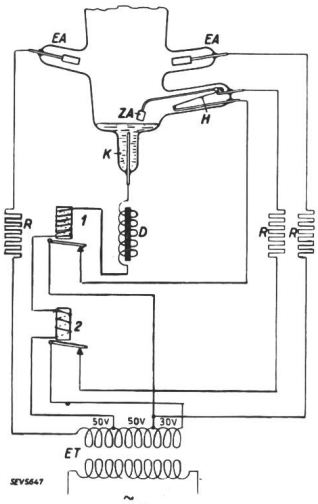

Fig. 1.
Thermische Zündung.

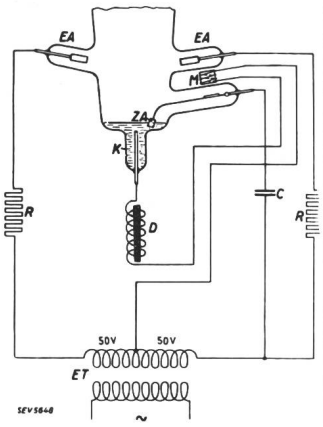

Fig. 2.
Resonanzzündung.

Um diesen Nachteil zu beheben, wurde eine andere neuartige Zündmethode entwickelt, welche als Resonanzzündung bezeichnet wird. Fig. 2 zeigt die Schaltung. Es werden dabei keine Relais mehr verwendet. Der Zünder ZA wird magnetisch durch die Spule M bewegt. In die Verbindungsleitung vom Erregertransformator nach dem Zünder ZA ist ein Kondensator *C* eingeschaltet. Im übrigen ist die Schaltung ähnlich wie bei jedem Erregerkreis. Im stromlosen Zustand berührt der Zünder die Quecksilberkathode K. Schaltet man nun den Strom ein, dann fliesst ein Wechselstrom vom Erregertransformator über den Kondensator *C* zum Zünder ZA, von da durch das Quecksilber K zur Kathodendrosselspule D und über die Magnetspule M, welche sich ausserhalb des Mutators, jedoch in der Nähe des Zünders befindet, zum Mittelpunkt des Erregertransformators zurück. Durch das in der Magnetspule M entstehende Magnetfeld wird der Zünder hochgezogen und dadurch der Zündstromkreis unterbrochen. Der hierbei entstehende heisse Funken leitet den Erregerlichtbogen ein. Der Strom fliesst jetzt abwechslungsweise als pulsierender Gleichstrom über die beiden Erregeranoden EA zum Quecksilber K, durch die Drosselspule D und über die Magnetspule M zum Mittelpunkt des Transformators. Der Zünder bleibt demnach hochgezogen. Eine spezielle Abschaltung für denselben ist nicht mehr nötig, da der Kondensator *C* den Gleichstrom sperrt. Aber auch ein Wechselstrom kann nicht mehr fliessen, da von der Zündanode der Strom nur noch in einer Richtung durch den Mutator fliessen kann. Zweckmässig wählt man die Selbstinduktion der Kathodendrosselspule D und die Kapazität des Kondensators *C* so, dass diese mit der Betriebsfrequenz annähernd in Resonanz sind. Die Spannung, welche hierbei am Kondensator auftritt, hat einen Scheitelwert von ca. 480 V und der Strom in der Drosselspule einen solchen von rund 16 A. Durch die Anwendung der Resonanz lassen sich mit Leichtigkeit ziemlich grosse elektrische Energien im Zündkreis aufspeichern. Der Unterbrechungsfunke ist demnach sehr heiss, bzw. es wird durch ihn viel Quecksilber verdampft und ionisiert, wodurch auch bei niederen Raumtemperaturen eine sofortige Zündung erfolgt.

Ein weiterer sehr wichtiger Vorteil dieser Zündmethode ist noch darin zu erblicken, dass bei einer falschen Zündung, d. h. wenn der Zünder beim Verlassen des Quecksilbers zur Kathode wird, die Nutzleistung nicht durch den schwachdimensionierten Erregerkreis fliessen kann. Der Kondensator *C* wirkt hierbei wie ein schnellwirkendes Relais. Er schützt den Erregerkreis gegen das Eindringen von Nutzleistung. In einem solchen Falle erlischt natürlich sofort der Lichtbogen, der Zünder fällt herunter und der Zündvorgang spielt sich von neuem ab.

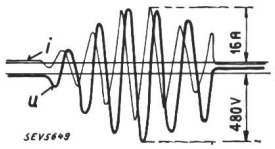

Fig. 3.
Strom und Spannung im Zündkreis während der Zündung.

Fig. 3 stellt den Verlauf von Strom und Spannung im Zündkreis während der Zündung dar.

Communication

de Monsieur *E. Roth*, Ingénieur en chef de la Société Alsthom, Belfort,

sur

la commande dissymétrique de l'allumage des anodes de mutateurs à vapeur de mercure.

Es wird das Prinzip eines Gittersteuerungssystems beschrieben, das erlaubt, den bei kleinen gleichgerichteten Spannungen geringen Leistungsfaktor wesentlich zu verbessern und das den gleichgerichteten Strom bei allen Belastungen gleichmässig auf alle Anoden verteilt.

L'auteur décrit le principe d'un système de commande par grilles qui permet d'améliorer sensiblement le facteur de puissance, faible lorsque les tensions redressées sont peu élevées, et de répartir uniformément le courant redressé sur toutes les anodes, à n'importe quelle charge.

Le plus grave inconvénient des mutateurs à vapeur de mercure contrôlés par grilles d'anodes est leur mauvais facteur de puissance pour les faibles valeurs de la tension redressée. Les constructeurs se sont efforcés d'y remédier, et divers procédés ont été proposés dans ce but.

Messieurs *Augier* et *Laurent*, de la Société «Als. Thom», à Belfort, ont imaginé un système de commande par grilles de l'allumage des anodes qui, lorsqu'il sera au point, permettra un gain important sur la puissance réactive consommée aux faibles valeurs de la tension redressée, et présentera l'avantage particulier de ne demander aucun sacrifice quant à l'utilisation des anodes du mutateur: à tous les régimes, le courant redressé se répartit également entre toutes les anodes. Nous appelons ce système «commande dissymétrique» de l'allumage des anodes. Il est basé sur les considérations suivantes:

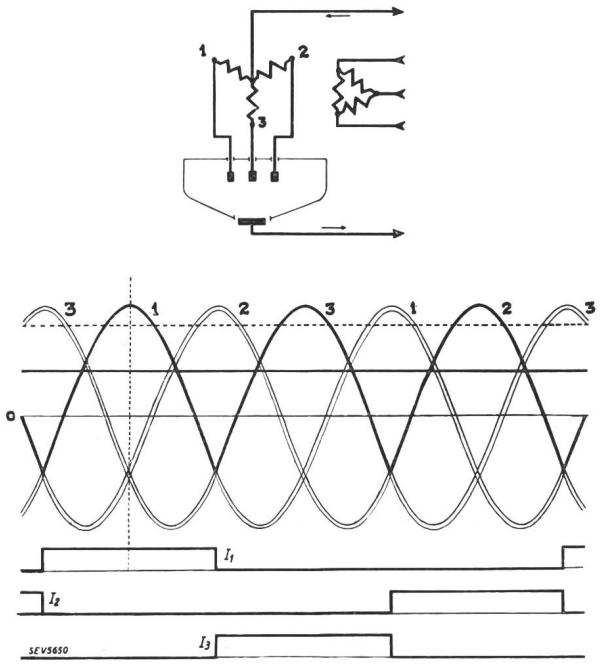

Fig. 1.
Fonctionnement à demi-tension d'un mutateur triphasé simple à commande dissymétrique.

Le mode de réglage de tension par grilles préconisé par *Toulon*, dans lequel on retarde de la même quantité les instants d'allumage de toutes les anodes, n'est que le moyen le plus symétrique d'agir sur la valeur de la tension redressée. D'autres modes d'action moins symétriques peuvent être imaginés, et il se trouve que certains d'entre eux possèdent des propriétés des plus intéressantes.

Considérons par exemple un mutateur à trois anodes alimenté par une étoile triphasée, et supposons que l'on retarde seulement l'allumage des anodes alternées. Plaçons-nous tout de suite dans le cas extrême où un allumage sur deux a été tellement retardé qu'il ne se produit plus.

La figure 1 montre l'allure que prennent la tension redressée et les débits des diverses anodes. On voit qu'une anode particulière telle que 1 ne débite plus qu'une fois toutes les deux périodes, mais qu'elle débite alors pendant 240°, soit un temps double de la durée normale de débit d'une anode

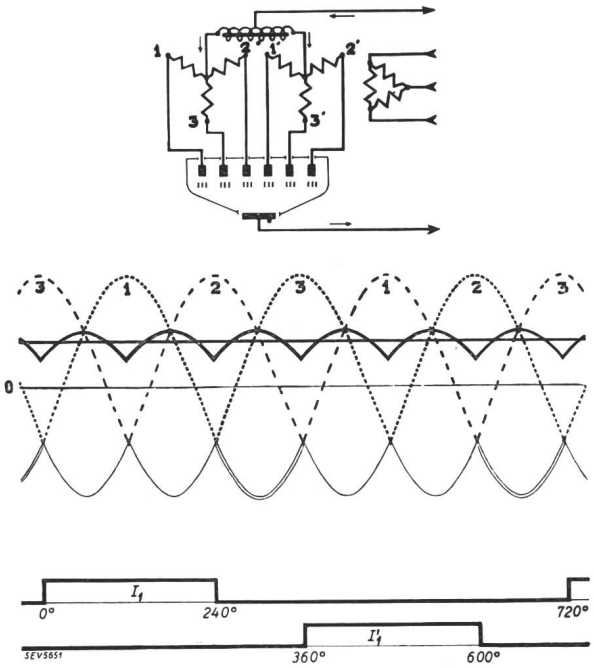

Fig. 2.
Fonctionnement à demi-tension d'un mutateur triphasé double étoile à commande dissymétrique.

dans un redresseur triphasé ordinaire. Son courant moyen n'est donc pas modifié. La valeur moyenne de la tension redressée est la moitié de la valeur maximum qu'elle aurait si le mutateur débitait naturellement sans aucun retard à l'allumage.

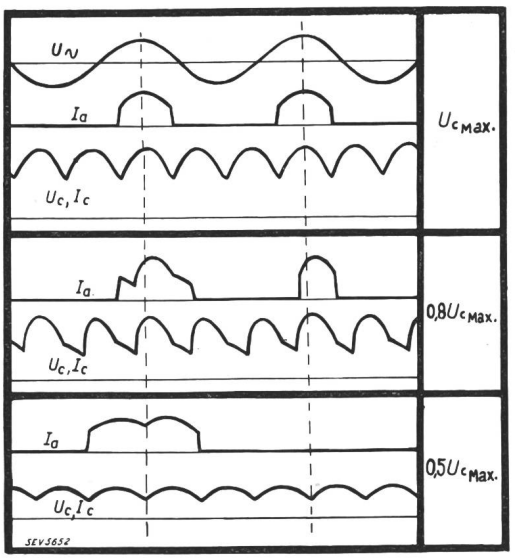

Fig. 3.
Mutateur triphasé double étoile à commande dissymmétrique débitant sur résistance pure: allure de la tension redressée et du courant d'anode pour divers réglages de tension.

Le point intéressant à noter, c'est que l'axe de l'onde de courant dans une phase 1 est en phase avec l'onde de tension de la même phase. En conséquence, le facteur de puissance est égal à l'unité, à

l'influence des harmoniques près, comme à pleine tension, tandis qu'il serait égal à 0,5 dans le cas de la commande symétrique des anodes.

On voit que l'onde de tension redressée est très ondulée. Mais il est facile d'y remédier.

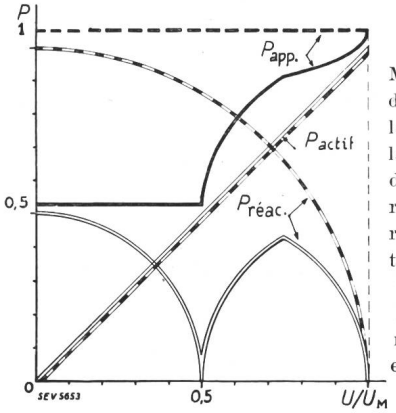

Fig. 4.
Mutateur à commande dissymétrique: allure de la puissance active, de la puissance réactive et de la puissance apparente, pour un courant redressé donné, en fonction de la tension redressée.
En traits discontinus, mêmes caractéristiques en commande symétrique.

La figure 2 montre que la combinaison de deux mutateurs triphasés à commande dissymétrique, réunis par une bobine de couplage des neutres, donne à 1/2 tension une onde de tension redressée résultante qui a la même allure qu'à pleine tension, à cela près que les amplitudes, et celles des harmoniques en particulier, sont réduites de moitié. Donc on gagne sur les harmoniques en même temps que sur le facteur de puissance.

Les courbes de la figure 3 ont été calquées sur des oscillogrammes pris sur un mutateur à double étoile triphasée débitant sur résistance pure. On y voit une tension de phase, le courant dans une des deux anodes de cette phase, et la tension redressée, soit à pleine tension, soit à demi-tension, soit à une tension intermédiaire où l'allumage des anodes alternées est retardé, mais non complètement empêché: chaque anode débite alors à toutes les périodes, mais pendant des durées inégales.

Les courbes de la figure 4 donnent, pour un courant redressé constant et en fonction des valeurs de la tension redressée, la puissance active, la puissance réactive et la puissance apparente, en traits pleins dans le cas de la commande dissymétrique, en pointillé dans le cas de la commande symétrique. On voit que la puissance apparente, ou encore le courant primaire, diminuent, pour un courant donné, au lieu de rester constants, quand on réduit la tension redressée.

Les caractéristiques ainsi obtenues sont les mêmes que si l'on disposait d'anodes supplémentaires connectées à des prises à demi-tension du transformateur, mais on a l'avantage de conserver, à tous les régimes, une excellente utilisation des anodes.

La figure 5 donne, en traits pleins pour la commande dissymétrique, en pointillé pour la commande symétrique, à la partie supérieure l'ondula-

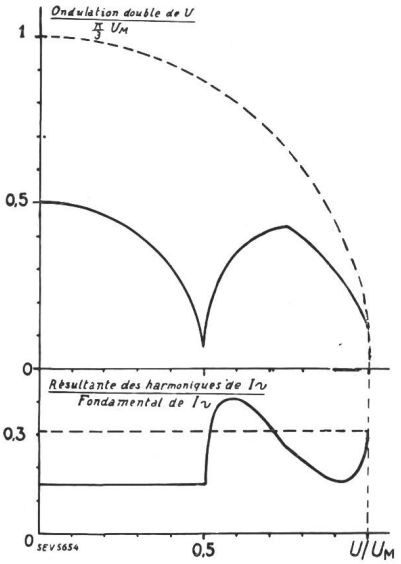

Fig. 5.
Mutateur à commande dissymétrique:
ondulation double de la tension redressée et valeur efficace résultante des harmoniques du courant primaire, en fonction de la tension redressée.
En traits discontinus, mêmes caractéristiques en commande symétrique.

tion double de la tension redressée, et à la partie inférieure la valeur efficace résultante de tous les harmoniques du courant primaire. On constate que les harmoniques du courant primaire sont fortement réduits pour les réglages de tension inférieurs à 20 % ou supérieurs à 50 %.

Weitere Diskussionsbeiträge.

Herr **W. Howald**, Direktor des Elektrizitätswerkes Winterthur: Das Elektrizitätswerk der Stadt Winterthur sah sich vor 1½ Jahren genötigt, zur Verbilligung seines Stadtumformerbetriebes und als Tramreserve eine neue Gruppe aufzustellen. Die wahlweise Abgabe von zwei verschiedenen Gleichspannungen konnte nur durch einen Mutator mit umschaltbarem Transformator ermöglicht werden. Aus Wirtschaftlichkeitsgründen wurde die Beschaffung einer Glas-Mutator-Anlage eingehend erwogen, besonders auch, weil dadurch Vakuumpumpe und Wasserkühlung weggefallen wären.

Das genaue Studium, speziell auch der Raumverhältnisse, führte dann doch zur Aufstellung eines Eisen-Mutators von 500 kW mit 100 % Ueberlastbarkeit während zwei Minuten. Dieser wurde mit geschlossener Rückkühlung für Zylinder und Vakuumpumpe ausgeführt, welche zeitweilig durch einen Ventilator beblasen wird. Was die Gittersteuerung zur Spannungsregulierung anbelangt, so wurde darauf verzichtet, weil sie sich im Preise ungefähr wie ein Stufenschalter mit automatischem Antrieb stellte. Für unsere Verhältnisse genügte der billigere Stufenschalter mit Handantrieb.

Bei der Inbetriebsetzung machte sich die Welligkeit bei den angeschlossenen Rundspruchhörern unangenehm bemerkbar. Es musste daher eine Glättungseinrichtung eingebaut werden, welche auf die Frequenz von 300, 600, 900 und 1200 Per./s abgestimmt ist. Der Verlust der Glättungseinrichtung beträgt ca. 0,3 % bei Vollast, die Kosten stellten sich auf ca. 8 % derjenigen des Mutators inkl. Transformator.

Ueber die Gesamtwirtschaftlichkeit wird noch die Angabe interessieren, dass die Jahresverluste von 28 % bei Umformerbetrieb auf 24 % herabgedrückt wurden, obschon der Mutator nur während der letzten 70 Tage des betreffenden Jahres im Betriebe stand.

Herr **E. Baumann**, Direktor des Elektrizitätswerkes der Stadt Bern: Angesichts der vorgerückten Stunde erlaubte ich mir das Wort nur deswegen zu verlangen, weil von Herrn Professor Kuhlmann die Praktiker aufgerufen worden sind, um sich über die Wirkungsgradverhältnisse der Mutatoren im Vergleich zu den rotierenden Umformern auszusprechen und weil die Pumpenfrage im Betrieb von Mutatoranlagen in der Diskussion eine so grosse Rolle gespielt hat. (Wie

eingangs erwähnt, ist die Diskussion hier nur unvollständig wiedergegeben. Red.)

Der Sprechende vertritt ein Werk, das sich bereits vor 18 Jahren zur Einrichtung einer Gross-Mutatorengruppe für die Strassenbahn-Umformerstation entschlossen hat. Diese Gruppe bewährte sich so gut, dass sukzessive bis zum Jahr 1930 sämtliche Umformergruppen der genannten Station durch Mutatoren ersetzt worden sind. Die Gesamtleistung der Mutatoranlage beträgt zur Zeit 2700 kW. Die Mutatoren haben sich im Betrieb in jeder Beziehung gut bewährt. Insbesondere kann ich feststellen, dass die mit den Mutatoren verbundenen Pumpen nie zu Anständen oder Schwierigkeiten im Betrieb Veranlassung gegeben haben.

Wir rechnen heute mit einem Jahreswirkungsgrad der Mutatoranlage von 93 bis 94 %, während die Anlage mit rotierenden Umformern seinerzeit einen Jahreswirkungsgrad von 81 bis 82 % aufwies. In beiden Fällen handelt es sich um Werte ohne Akkumulatoren-Batterie. Der Einbezug einer Batterie reduziert den Wirkungsgrad. Beim Betrieb mit Mutatoren konnte auf die Verwendung der Batterie verzichtet werden; sie wurde daher entfernt.

Monsieur **G. Devillez**, Ateliers de Constructions Electriques de Charleroi, donne, au courant de l'assemblée, les renseignements suivants:

1° A la suite de l'exposé de M. Dällenbach: L'incapacité des redresseurs de supporter des surcharges à l'état froid est bien connue et des indications à ce sujet peuvent être obtenues en mesurant (avec circuit courant continu ouvert), au moyen d'un oscillographe à rayons cathodiques, le faible courant passant dans le sens anode-cathode et notamment sa variation avec la température.

2° A des questions du Professeur Kuhlmann, relatives au prix des dispositifs d'égalisation de courant continu et aux pertes: Sur les redresseurs de 3000 V, 500 A, courant continu (surcharge de 1500 A pendant 5 minutes) de la ligne électrique Bruxelles-Anvers, des filtres ont été installés pour supprimer les perturbations téléphoniques. Leur prix ne dépasse pas 10 % du prix des groupes transformateurs-redresseurs correspondants et les résultats prévus ont été obtenus (réduction de l'ondulation dans le rapport de 1/20 environ). — Les pertes totales du filtre, qui comprend une réactance en série dans le circuit principal et 4 circuits dérivés accordés sur les fréquences 300, 600, 900 et 1200, sont de 2,5 % de celles du groupe transformateur-redresseur.

Der **Vorsitzende**, Herr Professor *E. Dünner*, spricht im Namen der elektrotechnischen Abteilung der ETH allen Herren Referenten und Diskussionsrednern für die Mitwirkung den besten Dank aus.

Technische Mitteilungen. — Communications de nature technique.

L'influence des chutes de tension dans les réseaux de distribution à basse tension sur la consommation en énergie d'éclairage.

621.311.152:621.32

La création incessante et l'emploi chaque jour croissant d'appareils domestiques utilisant l'énergie électrique à toute heure, mais particulièrement aux heures de pointe, ont pour conséquence de provoquer sur les réseaux de distribution à basse tension de très fortes chutes de tension.

Celles-ci sont extrêmement gênantes pour certains appareils et l'usager est très sensible aux variations de l'éclairement qu'il sait dues à l'irrégularité de la tension.

Une solution très simple et encore fort répandue consiste à augmenter simplement la tension au départ, de telle sorte que la tension moyenne aux heures de pointe soit à peu près normale. Cependant, cette opération n'est pas sans conséquences. Les abonnés les plus rapprochés du transformateur profitent d'abord d'une amélioration de l'éclairage, mais

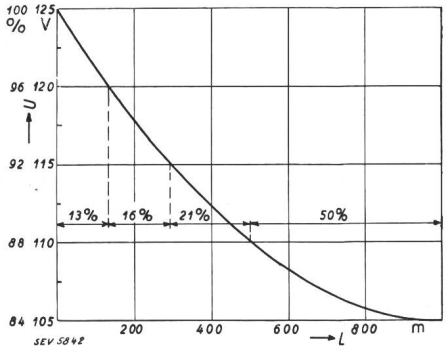

Fig. 1.
Chute de tension en fonction de la distance, et répartition des lampes suivant la tension.

comme la tension effective est supérieure à la tension nominale des lampes, celles-ci claquent au bout de peu de temps. Pour y remédier, l'installateur de l'endroit ne vend plus que des lampes pour la tension effective la plus élevée, au détriment des abonnés les plus éloignés du transformateur, dont les lampes sont alors sous-voltées de 10 à 15 % ou davantage suivant le cas.

Prenons par exemple un réseau simple, de 1000 m de longueur, dont la tension varie de 125 V au départ à 105 V au bout de la ligne. Supposons les charges non-inductives réparties uniformément le long de la ligne; quelles vont être les conditions de fonctionnement des lampes de 125 V? La courbe représentant la chute de tension y en fonction de la distance x au transformateur est une parabole dont l'équation est: $y = \frac{\varrho}{q} \cdot I \left(x - \frac{x^2}{2L} \right)$, où ϱ est la résistivité du fil conducteur, q la section d'un conducteur, I l'intensité du courant au départ et L la longueur de la ligne.

Les lampes vont donc être alimentées sous une tension rapidement décroissante, dans les proportions approximatives relevées sur la fig. 1, soit

13 %	avec	une	tension	moyenne	de 98 %
16 %	»	»	»	»	» 94 %
21 %	»	»	»	»	» 90 %
50 %	»	»	»	»	» 86 %

Il en résultera un éclairage insuffisant. Mais cet inconvénient ne sera pas le seul; les lampes, en effet, n'absorberont qu'une partie de leur puissance nominale suivant une proportion déterminée expérimentalement;

13 % de lampes absorberont en moyenne 98 % de la puissance nominale,

16 % de lampes absorberont en moyenne 91 % de la puissance nominale,

21 % de lampes absorberont en moyenne 86 % de la puissance nominale,

50 % de lampes absorberont en moyenne 80 % de la puissance nominale.

La consommation moyenne de l'ensemble des lampes ne sera que 85 % environ de l'énergie qu'elles devraient absorber normalement.

On peut affirmer que, sans tenir compte du développement certain de l'emploi de l'énergie électrique provoqué par la satisfaction de l'abonné, une bonne régulation de la tension assurera au moins 15 % d'augmentation de la vente en énergie d'éclairage, ce qui équivaut à une augmentation appréciable des recettes du distributeur. Le gain important résultant de la régulation de la tension justifie l'installation d'appareils régulateurs qui sont ainsi rapidement amortis. — (E. Lapière, Electricien, No. 1646 du 15 octobre 1936, p. 461.)

Mo.