

**Zeitschrift:** Bulletin de l'Association suisse des électriciens  
**Herausgeber:** Association suisse des électriciens  
**Band:** 27 (1936)  
**Heft:** 24

**Artikel:** Fortschritte und Neuerungen im Bau und in der Anwendung von Mutatoren. Die Entwicklung und Anwendung des Mutators  
**Autor:** Ehrensperger, C.  
**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-1057545>

### **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:** 08.01.2026

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

# ASSOCIATION SUISSE DES ÉLECTRICIENS

# BULLETIN

RÉDACTION:  
Secrétariat général de l'Association Suisse des Electriciens  
et de l'Union des Centrales Suisses d'électricité, Zurich 8

EDITEUR ET ADMINISTRATION:  
S. A. Fachschriften-Verlag & Buchdruckerei, Zurich 4  
Stauffacherquai 36/40

Reproduction interdite sans l'assentiment de la rédaction et sans indication des sources

XXVII<sup>e</sup> Année

N<sup>o</sup> 24

Vendredi, 27 Novembre 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 14<sup>e</sup> 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 der 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

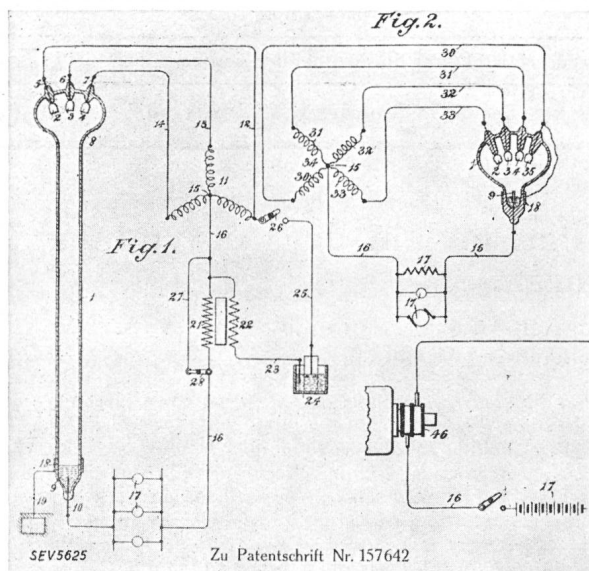


Fig. 1.

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 anfang, 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-

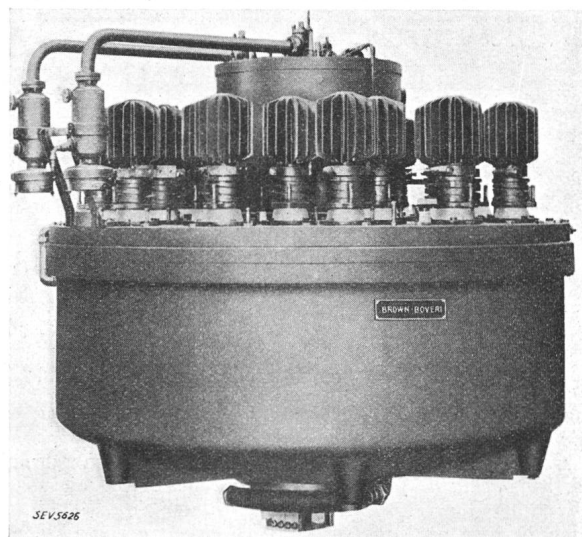


Fig. 2.

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

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.

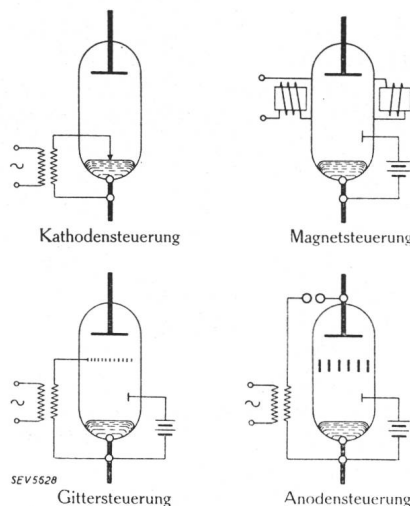


Fig. 4.

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 dieses 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

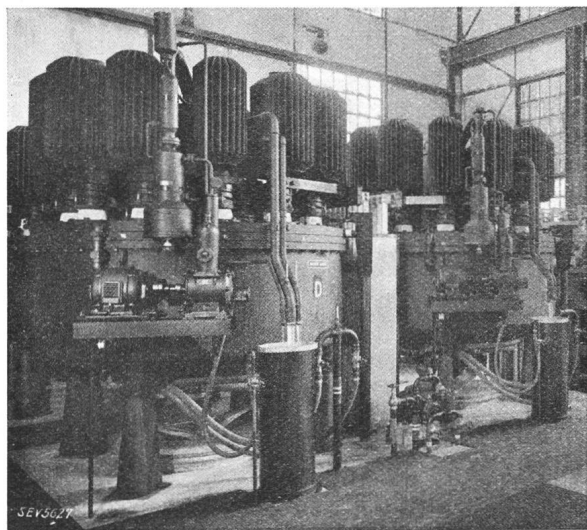


Fig. 3.

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 Wiederezündung der Anode beliebig verzögert werden. Auf Grund dieser Steuerung wurden schon im Jahre 1913 wichtige Erfindungen von



werden<sup>1)</sup>. Dadurch wird ein Wiederzünden irgend-einer 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<sup>2)</sup>. 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 Regulierungsvorgang 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<sup>3)</sup>. 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. Andererseits 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 Änderungen unterworfen ist.

<sup>1)</sup> S. Widmer, Zweite Weltkraftkonferenz 1930, Bericht Nr. 221.

A. Leuthold, Brown-Boveri-Mitt., Dez. 1934, S. 318.

<sup>2)</sup> Ch. Ehrensperger, Rev. Gén. Electr., 8. Okt. 1932, S. 469.

<sup>3)</sup> 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-Mutator 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 ausgenutzt ist. Bei der idealen Lösung C wird mit Hilfe eines einzigen

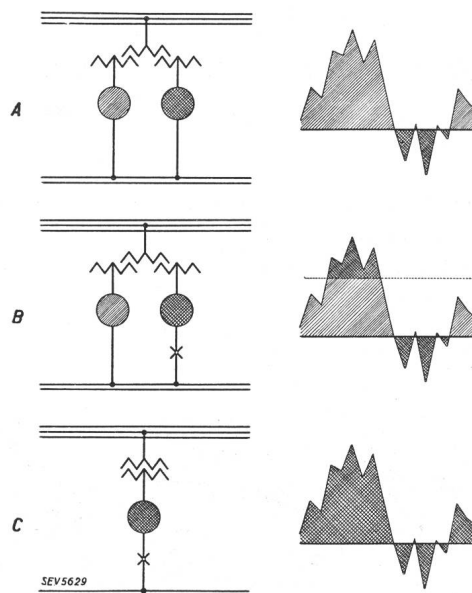


Fig. 5.

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 Überlast 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-

resultate 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.

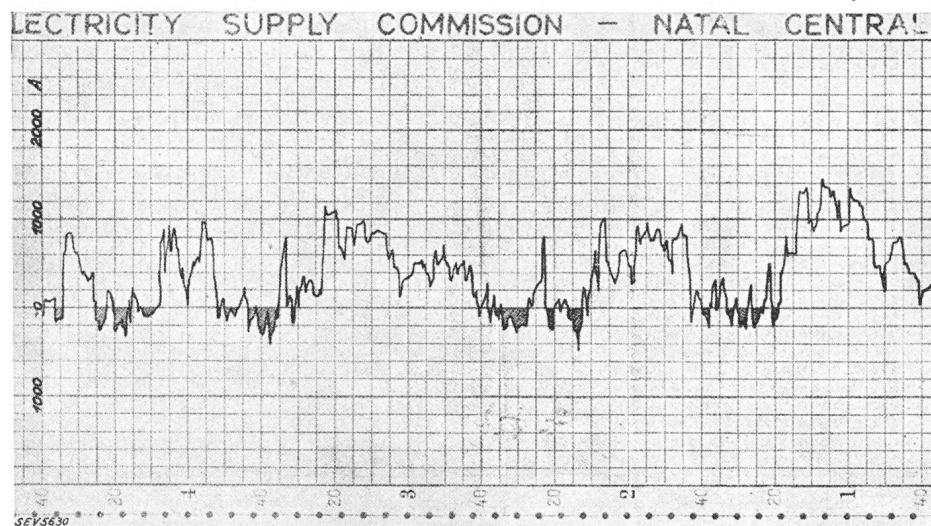


Fig. 6.

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 <sup>4)</sup>. 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 Betriebs-

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

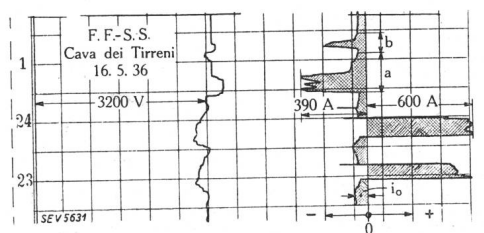


Fig. 7.

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-

<sup>4)</sup> 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.

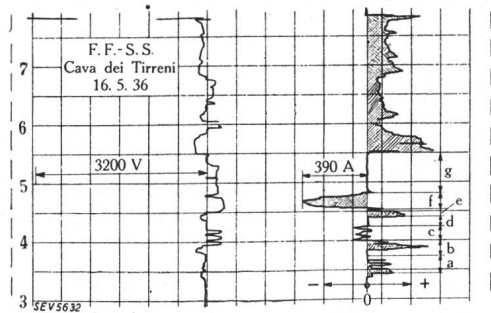


Fig. 8.

Unterstation Cava dei Tirreni der italienischen Staatsbahnen. Der umschaltbare Mutator übernimmt sowohl die ganze Leistungsabgabe an das Gleichstromnetz, als auch die Rekupe-  
rationsleistung. 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<sup>5)</sup>, 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 Ausnutzung 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-

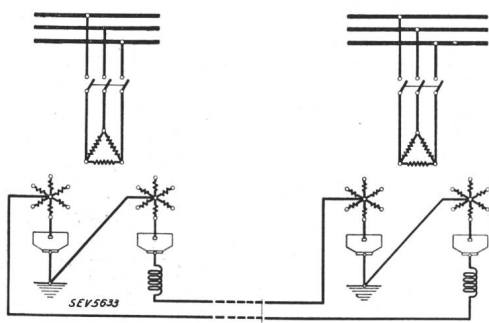


Fig. 9.

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

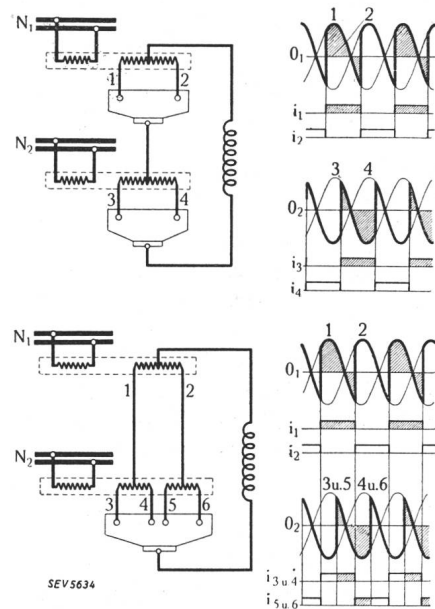


Fig. 10.

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<sup>6)</sup>.

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-

<sup>5)</sup> Vgl. Bull. SEV 1930, S. 157.

<sup>6)</sup> 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<sup>7)</sup>. 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 dreischenkligke 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

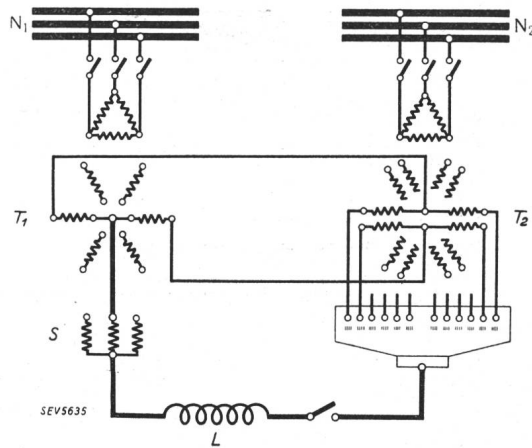


Fig. 11.

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.
- $S$  Dreischenkligke 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<sup>2</sup>/<sub>3</sub> Per./s<sup>8)</sup>. Diese Art der Kupplung ist etwas schwieriger als die letztge-

<sup>7)</sup> E. Kern, Brown-Boveri-Mitt., Dez. 1934, S. 214.

<sup>8)</sup> 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<sup>9)</sup>. 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

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.

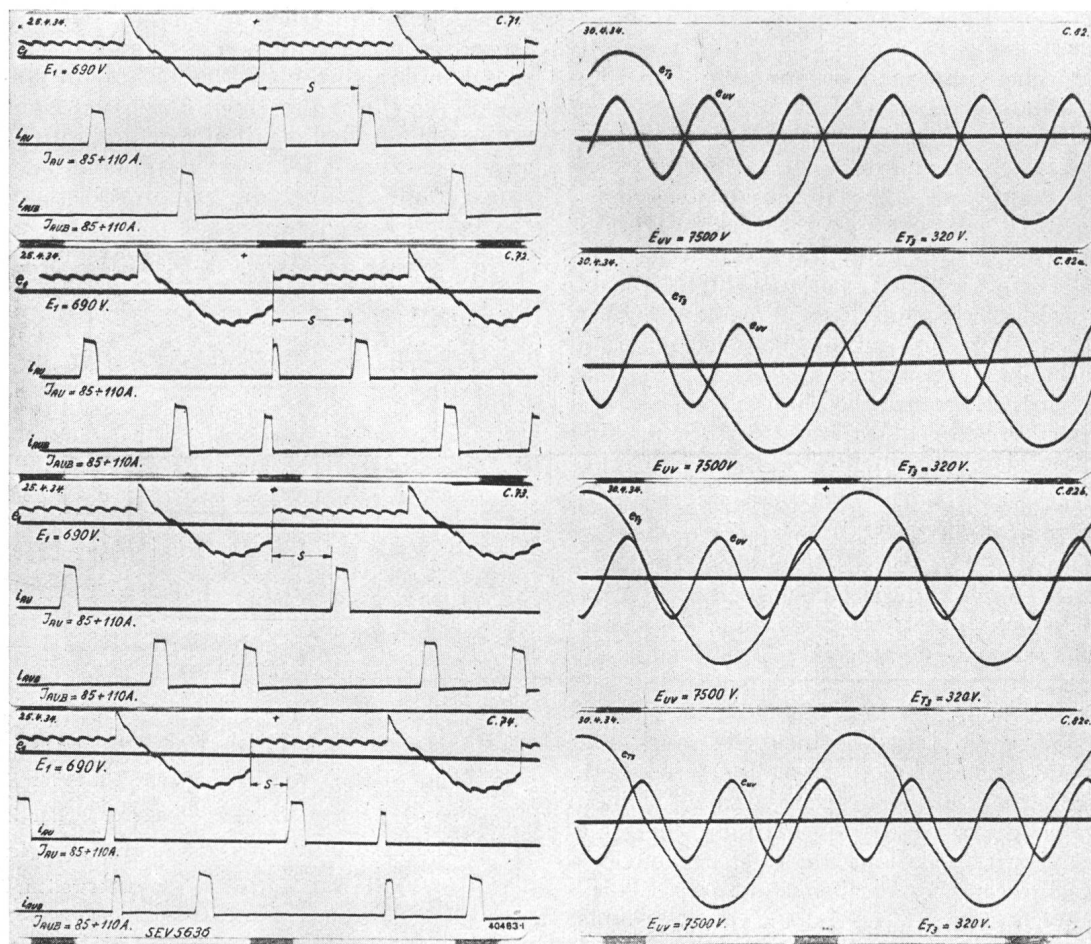


Fig. 12.

Dreiphasen-Einphasen-Mutator zur elastischen Kupplung eines Drehstromnetzes 50 Per./s mit einem Einphasennetz 16  $\frac{2}{3}$  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.  
 $e_{r3}$  = Spannung des Einphasennetzes.

Man erkennt das stetige Vorbeigleiten sowohl der Anodenströme als auch der Spannung 50 Per./s gegenüber der Einphasenspannung 16  $\frac{2}{3}$  Per./s.

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

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.

<sup>9)</sup> 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<sup>1)</sup> aus dem Referat

von

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

über

## Grossgleichrichter<sup>2)</sup> 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<sup>3)</sup> 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<sup>4)</sup>. 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.

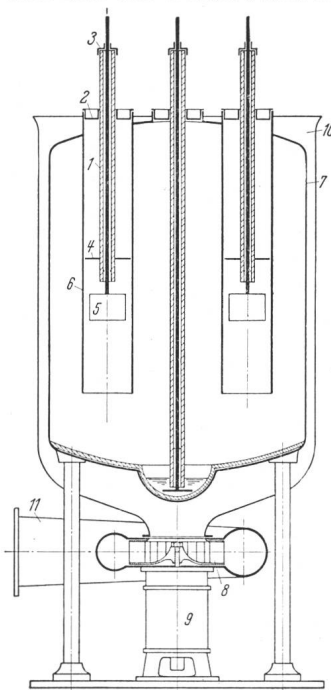


Fig. 1.

Schnitt durch einen Gleichrichter. 200 A, 600 V.

- 1 keramisches Rohr
- 2, 3 Metallmembran
- 4 Stützblech
- 5 Anode
- 6 Anodenschutzrohr
- 7 Gefässwand
- 8 Ventilator

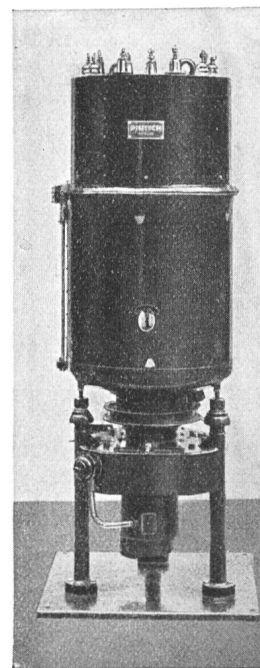


Fig. 2.

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

- 9 Motor
- 10 Lufteintritt
- 11 Luftaustritt

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

<sup>1)</sup> 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.

<sup>2)</sup> Auf Wunsch des Autors «Gleichrichter» statt «Mutator», siehe Einleitung Seite 685.

<sup>3)</sup> W. Dällenbach, ETZ, Bd. 55 (1934), S. 85; siehe Referat im Bull. SEV 1934, Nr. 7, S. 179.

<sup>4)</sup> Brown, Boveri-Mitt. 1935, Nr. 1/2, S. 63.