

Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins
Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke
Band: 22 (1931)
Heft: 22

Artikel: Neue Anwendungen des gesteuerten Gross-Gleichrichters
Autor: Kern, Erwin
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-1060537>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. 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. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

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. [Voir Informations légales.](#)

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. [See Legal notice.](#)

Download PDF: 03.04.2025

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

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

VERLAG UND ADMINISTRATION:
 Fachschriften-Verlag & Buchdruckerei A.-G., Zürich 4
 Stauffacherquai 36/38

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

XXII. Jahrgang

N^o 22

Mittwoch, 28. Oktober 1931

Neue Anwendungen des gesteuerten Gross-Gleichrichters.

Vortrag, gehalten an der Generalversammlung des SEV am 6. September 1931 in Bern,
 von Erwin Kern, Ingenieur, Baden.

Der Autor erläutert das Prinzip der Steuerung von Quecksilberdampfgleichrichtern, das darauf beruht, dass eine Anode nur dann zünden kann, wenn nicht nur sie selbst, sondern auch die ihr vorgelagerte Steuerelektrode («Gitter») positiv ist. Ein Lichtbogen entsteht also (bei positiver Anode) erst in dem Augenblick, in dem eine darauf gegebene negative Ladung des Gitters verschwindet. Damit hat man es in der Hand, den Lichtbogen in einem beliebigen Moment der Halbperiode entstehen zu lassen, woraus sich eine Reihe praktischer Anwendungen ergeben: Kurzschlüsse im Gleichstromnetz und Rückzündungen können durch den Gleichrichter selbst innerhalb einer Periode durch negative Aufladung des Gitters abgeschaltet bzw. gelöscht werden; die vom Gleichrichter abgegebene Spannung kann innerhalb beliebiger Grenzen reguliert werden, wobei die Steuerleistung etwa 10 000mal kleiner als die durchgehende Leistung ist, indem das Gitter synchron mit der Wechselspannung bei passender Phasenverschiebung geladen wird; ein Wechselstrom gegebener Frequenz kann in einen Wechselstrom einer kleineren Frequenz umgeformt werden, indem die gleichgerichtete Spannung im Takt der kleineren Frequenz von Null auf den Maximalwert und wieder auf Null reguliert wird und diese Impulse abwechselungsweise in verschiedener Richtung dem Verbraucher zugeleitet werden; ferner kann mit Hilfe des Gitters und geeigneter Steuerapparatur Gleichstrom in Wechselstrom umgeformt werden, und schliesslich ist es möglich, einen kommutatorlosen Einphasen-Serie-Motor zu bauen, indem der gesteuerte Gleichrichter die Rolle des Kommutators übernimmt. Der Autor erklärt alle diese von der A.-G. Brown, Boveri & Cie. in Baden entwickelten Anwendungen des gesteuerten Gleichrichters und erörtert deren praktische Tragweite.

Anschließend ist ein interessanter Diskussionsbeitrag von H. Hafner über ähnliche Versuche der Maschinenfabrik Oerlikon wiedergegeben.

Die Entwicklung der technischen Wechselstrom-Gleichstrom-Umformung während der vergangenen 20 Jahre brachte ausser den bekannten rotierenden Umformern das erste schüchterne Auftreten eines ganz neuen Umformers, des Lichtbogen-Gleichrichters. Die Arbeitsweise dieses neuen Umformers beruht auf der Ventilwirkung des Quecksilberdampflichtbogens im evakuierten Raum. Die vergangenen zehn Jahre waren Zeuge einer geradezu stürmischen Entwicklung dieses neuen Umformers, und heute schon ist der Quecksilberdampf-Grossgleichrichter aus einem unscheinbaren Laboratoriumsapparat ein technischer Umformer geworden, der die rotierenden Umformer auf nahezu allen ihren Anwendungsgebieten hart bedrängt und stellenweise ganz ersetzt

L'auteur explique tout d'abord le principe des redresseurs à vapeur de mercure à grille polarisée. Ce principe consiste en l'interposition d'une électrode auxiliaire («grille») qui empêche l'arc de se former tant qu'elle n'est pas positive, même si l'anode elle-même est positive. L'arc se forme donc au moment où, l'anode étant positive, la grille prend aussi une charge positive, et s'éteint au moment où l'anode devient négative, indépendamment de la charge de la grille. On peut ainsi régler à volonté le moment où l'arc doit se former. Cette possibilité donne naissance à une foule d'applications pratiques: les courts-circuits dans le réseau à courant continu peuvent être coupés et les retours de courant étouffés dans le redresseur même, en moins d'une période, par attribution à la grille d'un potentiel négatif au moment où le phénomène indésirable se produit; la tension redressée peut être réglée dans de larges limites par simple déphasage du point d'amorçage de l'arc, la puissance absorbée alors par le circuit de grille étant environ 10 000 fois plus faible que la puissance redressée; un courant alternatif de fréquence donnée peut être transformé en un courant alternatif de fréquence inférieure, en modulant la tension redressée en impulsions de la fréquence désirée et en envoyant ces impulsions dans un récepteur alternativement dans une direction et dans l'autre; on peut également transformer un courant continu en courant alternatif avec l'aide d'un dispositif de commande approprié; finalement, on peut construire un moteur série monophasé sans collecteur, le redresseur à grille polarisée fonctionnant comme collecteur. L'auteur passe ensuite en revue ces différentes applications développées par la maison Brown, Boveri S. A. et en commente la portée pratique.

A la suite de cet article est reproduit l'exposé donné à la discussion par M. Hafner sur des essais analogues effectués par les Ateliers de Construction d'Oerlikon.

hat. Der neue Umformer bietet auf Grund seiner Arbeitsweise eine Reihe von Vorteilen gegenüber den rotierenden Umformern, die desto mehr hervortreten, je höher die Anforderungen hinsichtlich Betriebsspannung, Wirkungsgrad, Kurzschlussfestigkeit und Unterhalt steigen.

Mit der Umformung von Wechselstrom in Gleichstrom ist aber die Anwendungsmöglichkeit des Quecksilberdampflichtbogens keineswegs erschöpft. Die physikalische Forschung hat gezeigt, dass derselbe ausser der im Gleichrichter verwerteten Ventilwirkung noch eine weitere Eigenschaft aufweist, die wir im folgenden vom Standpunkt ihrer technischen Anwendung betrachten werden, nämlich die *Steuerfähigkeit*. Die kurze, mir zuge-

621.314 + 621.314.65

messene Zeit gestattet leider nur, in grossen Zügen die Grundlage des gesteuerten Gleichrichters zu zeichnen und einen Ueberblick über die heute erkennbaren technischen Anwendungen desselben zu geben.

Aus der Radiotechnik ist die Elektronenröhre mit Steuergitter bekannt. Diese gestattet, den Strom im Anodenkreis in Abhängigkeit von der dem Gitter zugeführten Steuerspannung eindeutig zu beeinflussen. Wenn dem Steuergitter eine bestimmte negative Spannung gegenüber der Kathode erteilt wird, so kann der Stromdurchgang durch die Anode vollständig unterdrückt werden. Innerhalb gewisser Grenzen ändert sich der Anodenstrom proportional zur Gitterspannung. Unbedingte Voraussetzung für diese vollkommene Steuerwirkung ist ein Totaldruck im Entladungsraum von der Grössenordnung einiger Millionstelmmillimeter Quecksilbersäule.

Im Gegensatz zu diesen Hochvakuum-Elektronenröhren weisen die dampf- oder gasgefüllten Entladungsapparate insofern andere Verhältnisse auf, als sie bei viel geringeren Verlusten nur eine stark beschränkte Steuerfähigkeit aufweisen. Zu diesen gas- oder dampfgefüllten Entladungsapparaten zählen wir auch den Quecksilberdampf-Gleichrichter sowie auch die in letzter Zeit aufgetauchte Glühkathodenröhre mit Quecksilbereinschluss. Sämtliche hier zu besprechenden Anwendungen von gesteuerten Entladungsapparaten lassen sich, rein physikalisch betrachtet, sowohl mit reinen Hochvakuum-Glühkathodenröhren als auch mit gas- oder dampfgefüllten Apparaten durchführen. Für die Steuerung grosser Ströme kommen heute in erster Linie dampfgefüllte Entladungsapparate mit Quecksilberkathode nach Art der Quecksilberdampf-Gleichrichter in Frage, bei denen der Gas- und Dampfdruck Werte von der Grössenordnung einiger Tausendstelmmillimeter Quecksilbersäule erreicht. Zwar besteht auch bei diesen gas- oder dampfgefüllten Apparaten bei kleinen Leistungen und unter gewissen Voraussetzungen eine gewisse Modulationsfähigkeit des Anodenstromes. Auch das willkürliche Löschen eines Lichtbogens in einer beliebigen Spannungsphase ist mit Hilfe der Steuergitter bei kleinen Leistungen möglich.

Sämtliche hier zu besprechenden Anwendungen des gesteuerten Lichtbogens machen aber auf diese Eigenschaft der willkürlichen Beeinflussung des Anodenstromes durch das Steuergitter keinerlei Anspruch. Viel mehr werden wir uns in erster Linie mit derjenigen Eigenschaft des gesteuerten Lichtbogens befassen, die darin besteht, dass auch bei positiver Anode der Stromdurchgang durch ein der Anode vorgelagertes negativ geladenes Steuergitter verhindert werden kann, mit andern Worten: Eine Anode kann nur dann zünden, wenn nicht nur die Anode selbst, sondern auch die zugeordnete Steuerelektrode gleichzeitig positiv ist.

Wir wollen zur Abkürzung die Steuerelektrode kurz als Gitter und das ganze System, bestehend aus Anode, Gitter, Kathode und Gehäuse als Elektronenrelais bezeichnen. Sobald der Lichtbogen an

einer Anode brennt, wird bei den gas- oder dampfgefüllten Apparaten durch den Einfluss dieses Lichtbogens selbst die Wirkung des Gitters stark abgeschwächt, und diese genügt dann nicht mehr, um irgendwelche nennenswerte Leistungen zu modulieren oder gar zu unterbrechen. Das Elektronenrelais kann somit gewissermassen als hochempfindliches trägheitsloses Relais betrachtet werden. Man weiss, dass es gewisse hochempfindliche mechanische Kontaktvorrichtungen gibt, welche zwar imstande sind, einen Stromkreis zu schliessen, nicht aber einen Strom von nennenswerter Grösse zu unterbrechen. Die Wirkung des Gitters im Lichtbogen gleicht grundsätzlich derjenigen der genannten Kontaktvorrichtungen. Ich möchte vorerst die Wirkung des Steuergitters im Lichtbogen anhand einiger Skizzen erläutern. In Fig. 1 ist der

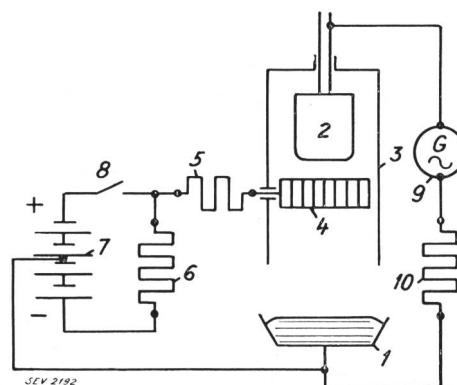


Fig. 1.

Prinzipschema zur Steuerung eines Quecksilberdampf-Ventils

- | | |
|------------------------|---------------------------|
| 1 Kathode des Ventils. | 6 Hilfswiderstand. |
| 2 Anode. | 7 Steuerstromquelle. |
| 3 Anodenhülse. | 8 Steuerkontakt. |
| 4 Steuergitter. | 9 Wechselstrom-Generator. |
| 5 Gitterwiderstand. | 10 Belastungswiderstand. |

Hauptstromkreis mit dem Wechselstromerzeuger 9, dem Verbraucher 10 und dem Steuerventil mit der Anode 2 und der Kathode 1 durch den Steuerkontakt 8, dem Widerstand 5 und dem Steuergitter 4 gesteuert. Bei geöffnetem Kontakt 8 ist das Steuergitter 4 gegenüber der Kathode 1 über den Widerstand 6 negativ geladen. Dieses Gitter verhindert dadurch die Zündung eines Lichtbogens an der Anode 2 und also auch den Stromdurchgang im Hauptstromkreis. Durch Schliessen des Kontaktes 8 wird das Gitter 4 positiv gegenüber der Kathode und gestattet hierdurch die Bildung eines Lichtbogens und den Stromdurchgang im Hauptstromkreis in der Richtung Anode 2 Kathode 1.

Erfolgt die positive Aufladung des Gitters gemäss Fig. 2 während derjenigen Halbwelle der Wechselspannung, die von der Anode nach der Kathode gerichtet ist, so setzt unmittelbar nach diesem Vorzeichenwechsel der Gitterspannung auch der Lichtbogen an der Anode ein. Erfolgt der Vorzeichenwechsel der Gitterladung bei brennender Anode in umgekehrtem Sinne, so ist derselbe ohne jede Einwirkung, d. h. der Lichtbogen kann bei grossen Strömen durch ein negativ geladenes Gitter

nicht gelöscht werden. Das Gitter kann erst nach dem natürlichen Erlöschen des Lichtbogens infolge der Unterbrechung der Anodenspannung wieder zur Wirkung kommen.

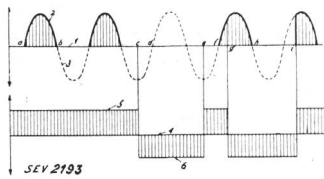


Fig. 2.

Steuerung eines Quecksilberdampf-Lichtbogens durch gesteuerte Gitter.

- 1 Nulllinie der Anodenspannung und des Anodenstromes.
- 2 Anodenstrom.
- 3 Negative Halbwellen der Anodenspannung.
- 4 Nulllinie der Gitterspannung.
- 5 Positive Gitterspannung.
- 6 Negative Gitterspannung.

Es ist daraus ersichtlich, dass sich ein pulsierender Gleichstrom im Gegensatz zu einem kontinuierlichen Gleichstrom mit Hilfe von gesteuerten Gittern mit einer Toleranz von $\frac{1}{2}$ Periode vollkommen steuern lässt, indem in der ersten stromlosen Pause nach Einsetzen einer negativen Gitterladung diese letztere zur Wirkung kommt und die dem Gitter

zugeordnete Anode sperrt. Wir werden sehen, dass schon mit dieser einzigen Eigenschaft der willkürlichen Zündung des Lichtbogens sich eine ganze Reihe von neuen technischen Anwendungsmöglichkeiten des gesteuerten Quecksilberdampflichtbogens ergeben. Ich nenne als wichtigste derselben:

1. Die Abschaltung von Kurzschlüssen im Gleichstromnetz und die Löschung von Rückzündungen mit Hilfe des Gleichrichters selbst.
2. Die Regulierung der vom Gleichrichter abgegebenen Spannung.
3. Die unmittelbare statische Umformung von Wechselstrom einer gegebenen Frequenz in Wechselstrom einer andern kleineren Frequenz.
4. Die statische Umformung von Gleichstrom in Wechselstrom.
5. Der kommutatorlose Einphasenlokomotivmotor für beliebige Frequenz.

Man beachte, dass die meisten dieser Anwendungsgebiete mit einer Gleichrichtung eines Stromes nichts zu tun haben. Vielmehr wird darin in erster Linie die oben angedeutete Sperrfunktion des Steuergitters nutzbringend herangezogen.

1. Die Abschaltung von Kurzschlüssen im Gleichstromnetz und die Löschung von Rückzündungen mit Hilfe des Gleichrichters selbst.

Wir haben anhand von Fig. 2 erkannt, dass sich ein Quecksilberdampflichtbogen, der von einer Wechselstromquelle gespeist wird, mit Hilfe der vorgelagerten Gitter steuern lässt. Diese Stromverhältnisse liegen beim normalen Quecksilberdampf-Gleichrichter tatsächlich vor, und es lässt sich somit, äusserlich betrachtet, ein derartiger Gleichrichter durch blosses negatives Aufladen der Steuergitter absolut zuverlässig löschen und damit die Stromzufuhr ins Gleichstromnetz unterbrechen. Diese Möglichkeit lässt sich auch zur Abschaltung von Kurzschlüssen im Gleichstromnetz und zur Lö-

schung von Rückzündungen im Gleichrichter selbst verwenden, indem man die negative Aufladung der Gitter selbsttätig in Abhängigkeit von dem vom Gleichrichter aufgenommenen Strom, also durch ein Maximalstromrelais, durchführt. Diese Unterbrechung des Lichtbogens erfolgt dabei äusserst rasch, innerhalb einer Periode des zugeführten Wechselstromes, während ein Oelschalter bei Frequenz 50 das Mehrfache dieser Zeit zur Unterbrechung eines Kurzschlusses beansprucht. Dementsprechend sind auch die Rückwirkungen derartiger Kurzschlüsse auf die Netzspannung und auf die im Kurzschlusskreis liegenden Apparate entsprechend geringer als bei Abschaltung durch den Oelschalter. Ein auf diese Weise gelöschter Kurzschlussvorgang verläuft so rasch, dass er in der Regel im Wechselstromnetz ohne besondere Mittel überhaupt nicht wahrgenommen wird. Das Maximalstromrelais, welches die Umsteuerung der Gitter auf negatives Potential durchführt, kann in Anbetracht der äusserst geringen Steuerleistung sehr leicht und mit geringster Eigenzeit gebaut werden. Das Auslöschn von Rückzündungen mit Hilfe der gesteuerten Gitter hat ganz besondere Bedeutung beim Hochstromgleichrichter, in welchem die sehr grossen, bei Rückzündungen auftretenden Kurzschlussströme infolge der raschen Abschaltung durch die Gitter in viel geringerem Masse die aktiven Teile des Gleichrichters angreifen als bei Abschaltung durch den langsameren Oelschalter. In Fig. 3 gibt Kurve 1 den Zeitmassstab, Kurve 2 den Kurzschlussstrom und Kurve 3 den Gitterstrom. Die gesamte Dauer des Kurzschlusses erstreckt sich auf 0,014 s, wobei ein Scheitelstrom von 12 200 A erreicht wird. Die Eigenzeit des verwendeten Maximalrelais beträgt 0,0027 s. Das gesteuerte Gitter gestattet somit durch Aufdrücken einer negativen Spannung Kurzschlüsse in dem vom Gleichrichter gespeisten Gleichstromnetz sowie auch Rückzündungen innerhalb einer Periode mit Hilfe des Gleichrichters selbst abzuschalten. Die A.-G.

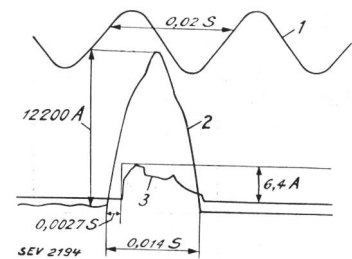


Fig. 3.

Löschn eines Kurzschlusses im Gleichstromnetz durch gesteuerte Gitter.

- 1 Zeitmassstab, Wechselspannung 50 Per./s.
- 2 Kurzschlussstrom.
- 3 Gitterstrom während des Löschvorganges.

Brown, Boveri & Cie. hat vor ungefähr 4 Jahren 3 Grossgleichrichteranlagen mit insgesamt 12 Gleichrichtern mit dieser Einrichtung zur Löschung von Rückzündungen ausgerüstet, die seither zur vollen Zufriedenheit arbeiten.

2. Regulierung der vom Gleichrichter abgegebenen Gleichspannung.

Bei der vorgenannten Anwendung der gesteuerten Gitter war die Rede davon, dem im allgemeinen dauernd positiv geladenen Gitter während einer

gewissen Dauer über ein Relais ein negatives Potential aufzudrücken und den Stromdurchgang gänzlich zu sperren. In den nachfolgenden Anwendungen handelt es sich um eine periodische Steuerung der Gitter in dem Sinne, dass den Gittern abwechselungsweise positive und negative Spannungsimpulse zugeführt werden, deren Grundfrequenz mit der Frequenz der Anodenspannung selbst übereinstimmt. Diese periodische Steuerung der Gitter kann sowohl mit Hilfe von Induktionsreglern als auch durch synchron rotierende Kontaktapparate erfolgen. Die für die Steuerung erforderliche Leistung ist ihrer Grössenordnung nach 10 000mal kleiner als die durchgehende Leistung des gesteuerten Lichtbogens.

Die Regulierung der Gleichspannung mit Hilfe der Gittersteuerung geht von folgender Ueberlegung aus: Ändert man, ausgehend von einem negativ geladenen Gitter und gesperrtem Stromdurchgang, jeweils während der positiven Halbwelle der Anodenspannung das Vorzeichen der Gitterladung von einem negativen Wert auf einen positiven Wert, so zündet die Anode je nach dem Zeitpunkt, also der Phase dieses Vorzeichenwechsels, periodisch, und brennt so lange, als die Anodenspannung positiv ist. Mit anderen Worten: Es lässt sich je nach Spannungsphase, in welcher die Zündung der Gitter erfolgt, die wirksame Spannung im Gleichstromnetz willkürlich beeinflussen. Aus der verfügbaren positiven Spannungshalbwelle der ankommenden Wechselspannung wird dann nur ein kleinerer oder grösserer Bruchteil vom Gleichrichter durchgelassen und für das Gleichstromnetz

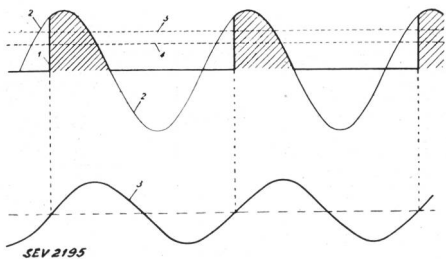


Fig. 4.

Regulierung der vom Gleichrichter abgegebenen Spannung durch gesteuerte Gitter.

- 1 Anodenstrom.
- 2 Anodenspannung.
- 3 Gitterspannung.
- 4 Mittelwert der regulierten Spannung.
- 5 Mittelwert der unregulierten Spannung.

nutzbar gemacht. Fig. 4 veranschaulicht dieses Prinzip: Der Mittelwert der stark ausgezogenen Kurve ist um so kleiner, je später die Zündung erfolgt. Diese Spannungsregulierung durch gesteuerte Gitter besitzt den Vorteil eines sehr bescheidenen Aufwandes an Steuerapparatur. Indessen sind ihrer Verwendung gewisse Grenzen gesetzt mit Rücksicht auf den Leistungsfaktor des aufgenommenen Wechselstroms, welcher durch die Gitterregulierung je nach dem Regulierbereich mehr oder weniger reduziert wird. Grundsätzlich ist eine Spannungsregulierung von 0 bis 100 % der Nennspannung mög-

lich. Der praktisch ausgenützte Regulierbereich richtet sich von Fall zu Fall nach den gerade vorliegenden Anforderungen in bezug auf Welligkeit des Gleichstromes und den Leistungsfaktor. Im allgemeinen wird man nicht über einen Regulierbereich von $\pm 10\%$, also insgesamt 20% hinaus gehen. Die Strom- und Spannungsverhältnisse ändern sich im übrigen gegenüber dem gebräuchlichen 6-Phasengleichrichter nicht wesentlich und gleichen denjenigen eines normalen Gleichrichters. Fig. 5 zeigt das Prinzipschema, Fig. 6 die schematische Spannungskurve. In Fig. 7 ist links auf dem

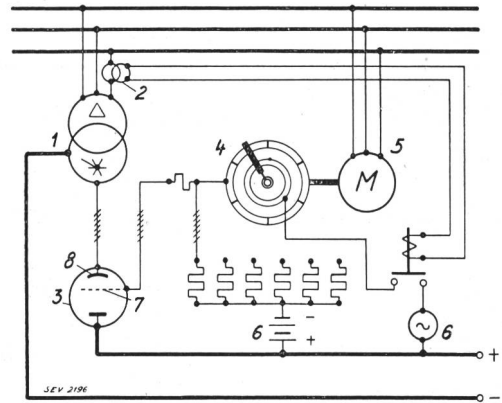


Fig. 5.

Prinzipschema eines Gleichrichters mit Spannungsregulierung und Ueberstromschutz durch gesteuerte Gitter.

- 1 Transformator.
- 2 Stromwandler.
- 3 6-Phasengleichrichter.
- 4 Verteiler.
- 5 Motor zum Verteiler.
- 6 Steuerstromquelle.
- 7 Steuergitter.
- 8 Anode.

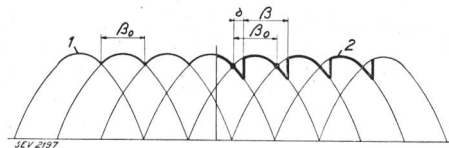


Fig. 6.

Spannungsregulierung am 6-Phasengleichrichter.

- 1 Nichtregulierte Gleichspannung.
- 2 Regulierte Gleichspannung.
- β_0 Arbeitszone einer Anode, unreguliert.
- β Arbeitszone einer Anode, reguliert.

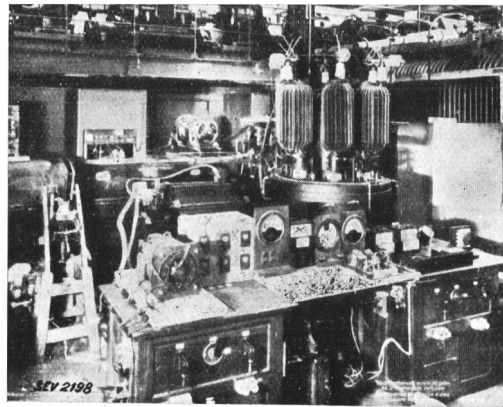


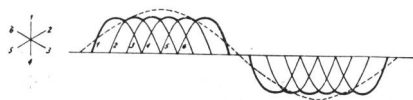
Fig. 7.

Tische der von einem kleinen Synchronmotor angetriebene Kontaktgeber für die Steuerung der Gitter sichtbar, im Vordergrund auf dem mittleren Tisch das Maximalstrom-Relais zur Abschaltung von Kurzschlüssen, im Hintergrund der gesteuerte Gleichrichter. Selbstverständlich kann eine derartige Spannungsregulierung auch automatisch erfolgen, ebenso kann die abgegebene Gleichspannung automatisch in Funktion der Belastung reguliert werden. Man erkennt aus diesen Ueberlegungen, dass der gesteuerte Gleichrichter mit den einfachsten Mitteln eine stetige und verlustlose Regulierung der vom Gleichrichter abgegebenen Gleichspannung ermöglicht.

3. Die unmittelbare statische Umformung von Wechselstrom einer gegebenen Frequenz in Wechselstrom einer andern, kleineren Frequenz.

Denken wir uns die vorhin besprochene Spannungsregulierung in dem Sinne durchgeführt, dass die Gleichspannung periodisch in einem gewissen Takte von einem Maximalwert auf den Wert Null reguliert wird, so kann auf diese Weise aus einem Wechselstrom gegebener Frequenz ein pulsierender

Gleichstrom einer kleineren Frequenz erzeugt werden. Leitet man zwei derartige pulsierende Ströme in entgegengesetzter Richtung einem Stromverbraucher zu, derart, dass die Stromimpulse des einen Gleichstroms in die stromlosen Zwischenräume des andern Gleichstroms hineinzuliegen kommen, so erhält man einen Wechselstrom kleinerer Frequenz (Fig. 8). Diese Frequenz kann mit Hilfe des Taktes, in welchem die Unterbrechung der beiden zusammengesetzten pulsierenden Gleichströme erfolgt, in gewissen Grenzen beliebig gewählt werden. In Fig. 9 ist das Prinzipschema einer solchen Umformung dargestellt. Fig. 10 zeigt im Vordergrund in der Mitte den von einem kleinen Synchronmotor angetriebenen Kontaktapparat, links den Gleichrichter. Fig. 11 zeigt ein Oszillogramm der ankommenden Spannung von 50 Per./s und der abgegebenen Spannung von $16\frac{2}{3}$ Per./s. Wir kommen auf diese Weise zu einer Möglichkeit, einen Mehrphasenstrom gegebener Frequenz in einen Wechselstrom einer andern, kleineren Frequenz umzuformen. Auf dieser Grundlage lässt sich vorerst eine Frequenzumformung durchführen, in welcher das Verhältnis der primären zur sekundären Frequenz konstant, die Kupplung der beiden Netze in bezug auf die Frequenz also starr ist. Auf Grund der bisherigen Beobachtungen lässt sich dieses Prinzip aber auch für eine elastische Kupplung zweier Netze mit verschiedenen Frequenzen anwenden¹⁾. Bei der Aufstellung von rotierenden Frequenzumformern zur Kupplung zweier Netze verschiedener Frequenz wird meistens mit der eigentlichen Uebertragung der Wirkleistung



SEV 2199

Fig. 8.

Umformung eines Mehrphasenstromes von 50 Per./s in einen Einphasenstrom von $16\frac{2}{3}$ Per./s.
1 bis 6 = Aufeinanderfolgende Phasenspannungen des primären 6-Phasensystems.

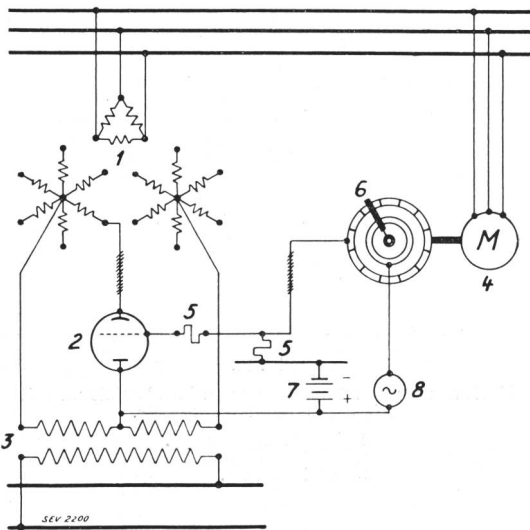


Fig. 9.

Prinzipschema der Umformung von Mehrphasenstrom von 50 Per./s in Einphasenstrom von $16\frac{2}{3}$ Per./s durch Elektronenrelais.

- 1 Mehrphasentransformator 50 Per./s.
- 2 Elektronenrelais.
- 3 Einphasentransformator $16\frac{2}{3}$ Per./s.
- 4 Synchronmotor zum Kontaktgeber.
- 5 Gitterwiderstände.
- 6 Rotierende Bürste am Kontaktgeber.
- 7 Steuerstromquelle.
- 8 Steuerstromquelle.

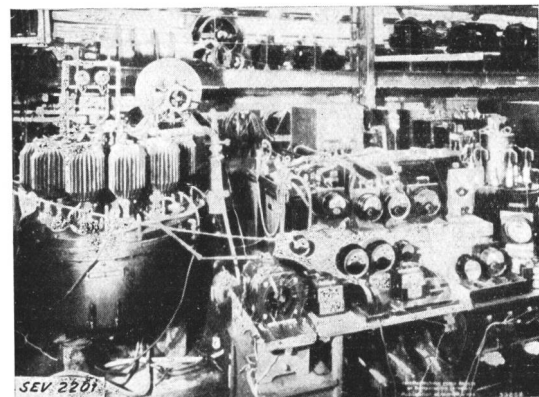


Fig. 10.

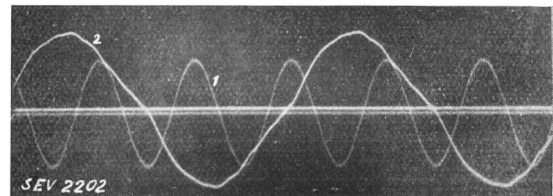


Fig. 11.

- 1 Wechselstrom 50 Per./s.
- 2 Umgeformter Wechselstrom $16\frac{2}{3}$ Per./s.

¹⁾ Siehe auch Siemens-Zeitschrift, März 1931.

auch eine Erzeugung von nachteiliger Blindleistung durch den Motor oder den Generator des Umformers oder beide zugleich verbunden. Wenn auch, physikalisch gesprochen, die Möglichkeit der statischen Erzeugung von nachteiliger Blindleistung heute schon deutlich zu erkennen ist, so kann dennoch an eine technische Nutzbarmachung dieser Erkenntnis vorläufig noch nicht gedacht werden. Es ist also nach dem heutigen Stande der Studien noch nicht möglich, irgend welche Blindleistung aus dem Umformer selbst herauszuholen, wie dies bei dem bekannten rotierenden Frequenzumformer in der Regel geschieht. Demgegenüber kann die Frage der Umkehrbarkeit des Energieaustausches beim statischen Umformer schon heute bejaht werden. Es ist aber verfrüht, heute schon auf die verschiedenen damit zusammenhängenden Regulierprobleme einzutreten. Dieser statischen Frequenzumformung kommt vor allem im Hinblick auf die Speisung eines Eisenbahnnetzes mit niedriger Periodenzahl durch das industrielle Energieversorgungsnetz eine gewisse Bedeutung zu. Wir stellen somit fest, dass wir die Möglichkeit haben, Wirkleistung aus einem Netz gegebener Frequenz in ein anderes Netz mit kleinerer Frequenz und umgekehrt ohne Dazwischentreten von mechanischer Energie durch unmittelbare elektrische Umformung zu übertragen. Diese statische Umformung bringt gegenüber der Umformung durch rotierende Maschinen beträchtliche Vorteile in bezug auf Anschaffungskosten, Wirkungsgrad und Platzbedarf. Um nur eine Zahl zu nennen, will ich hervorheben, dass sich der Wirkungsgrad des statischen Umformers um 10 bis 15 % günstiger stellt als derjenige des rotierenden Umformers. Eine statische Umformergruppe von einer Leistung von ca. 8000 kW stellt sich im Preise ungefähr 30% günstiger als eine rotierende Gruppe.

4. Die statische Umformung von Gleichstrom in Wechselstrom.

Untersuchen wir weiter die Frage, ob sich die vom Gleichrichter her bekannte Umformung von Drehstrom in Gleichstrom nicht auch umkehren, d. h. ob sich nicht auch mit Hilfe gesteuerter Gleichrichter Gleichstrom in Drehstrom umformen lässt. Sie wissen, dass die heutige Elektrowirtschaft sowohl in bezug auf Energiemengen als auch bezüglich der Uebertragungsdistanzen immer steigende Anforderungen stellt. Es besteht heute schon und je länger desto dringender die Notwendigkeit, für die Uebertragung grösster Leistungen auf Distanzen von mehreren 100 km die bekannten Unannehmlichkeiten des Wechselstromes für die Fernübertragung auszuschalten. An die Stelle des Wechselstromes kann als Stromsystem für die Fernübertragung selbst nur der Gleichstrom treten, der in dem Moment in den Bereich ernsthafter Betrachtung fällt, wo die Umformung von Drehstrom auf Gleichstrom und umgekehrt von Gleichstrom auf Drehstrom mit den erforderlichen Spannungen und Einheitsleistungen möglich wird. Während die Drehstrom-Gleichstromumformung mit Hilfe des be-

kannten normalen Gleichrichters möglich ist, erweist sich für die statische Gleichstrom-Drehstromumformung die Anwendung des Elektronenrelais als unumgänglich notwendig. Als weitere allgemeine Bedingung für eine derartige Umformung ist sodann die Mitwirkung einer Synchronmaschine in dem von diesem Umformer gespeisten Wechselstromnetz zu nennen. Diese Synchronmaschine kann dabei gleichzeitig irgend eine der drei möglichen bekannten Normalfunktionen erfüllen, sei es als Synchrongenerator, als Synchronmotor oder

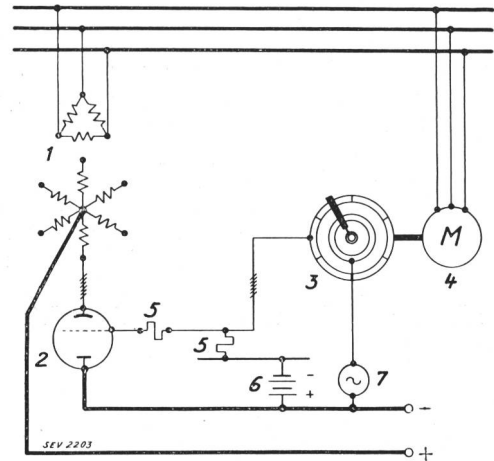


Fig. 12.

Prinzipschema der Umformung von Gleichstrom in Wechselstrom durch Elektronenrelais.

- 1 Transformator.
- 2 Elektronenrelais.
- 3 Kontaktgeber.
- 4 Synchronmotor.
- 5 Gitterwiderstände.
- 6 Steuerstromquelle.
- 7 Steuerstromquelle.

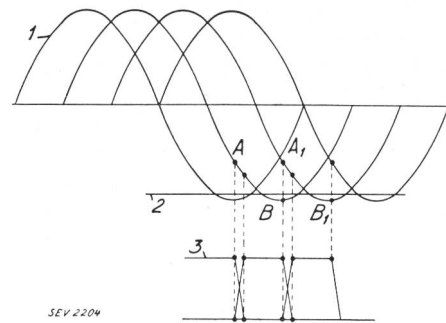


Fig. 13.

Umformung von Gleichstrom in Wechselstrom mit Hilfe des Elektronenrelais.

- 1 Wechselspannung.
- 2 Gleichspannung.
- 3 Gleichstrom.

als Synchron-Phasenschieber. Weder die Schaltung noch die Arbeitsweise einer derartigen Synchronmaschine unterscheidet sich bei ihrer Verwendung in Verbindung mit der Gleichstrom-Drehstromumformung irgendwie von der normalen Synchronmaschine. Diese Synchronmaschine spielt im Zusammenhang mit dem eigentlichen Gleichstrom-Drehstromumformer, bestehend aus Transformator,

Elektronenrelais und der Steuerapparatur, die Rolle des Taktgebers, indem sie die Frequenz des gespeisten Wechselstromnetzes festlegt. Unter dieser Voraussetzung lässt sich die Umformung von Gleichstrom in Drehstrom in einfacher Weise erläutern (Fig. 12 und 13). Die Anoden des Elektronenrelais müssen in demjenigen Abschnitt der Wechselspannung brennen, in welchem der Momentanwert der Wechselspannung ungefähr gleich gross wie die ankommende Gleichspannung und dieser entgegengerichtet ist (siehe Abschnitt $A-B$, A_1-B_1 in Fig. 13). Die Ablösung zweier unmittelbar nacheinander brennender Anoden erfolgt mit Hilfe der Gitter in einem Zeitpunkt, wo der Momentanwert der Wechselspannung der neu einsetzenden Anode noch kleiner ist als derjenige der schon brennenden Anode. Die in diesem Moment zwischen den beiden sich ablösenden Anoden bestehende Spannungsdifferenz hat zur Folge, dass der Lichtbogen an der brennenden Anode löscht und an der nächstfolgenden Anode zündet. Auf diese Weise fliessen aus dem Gleichstromnetz stetig aufeinander folgende, sich gegenseitig überlappende Stromimpulse nacheinander in die einzelnen Phasen des Wechselstromnetzes. Diese Stromimpulse sind der Eigenspannung des Wechselstromes im Transformator entgegengerichtet, d. h. die Energie fliesst tatsächlich aus dem Gleichstromnetz ins Wechselstromnetz hinein. Durch passende Einstellung des Zündpunktes A der Anoden mit Hilfe des Kontaktgebers kann die durchgehende Leistung bis zum Leerlauf stetig reguliert werden.

Diese Umformung von Gleichstrom in Drehstrom geht in bezug auf Leistungsfaktor, Strom- und Spannungsverlauf, Verzerrung der Stromkurve usw. unter denselben Verhältnissen vor sich wie die Umformung im normalen Gleichrichter, so dass diesbezüglich keine grundsätzlich neuen Erscheinungen auftreten. Die Möglichkeit der statischen Umformung von Gleichstrom in Wechselstrom birgt, abgesehen von der eigentlichen Hochspannungs-Gleichstromübertragung, auch die Möglichkeit der elastischen Netzkopplung in sich, sie ergänzt somit die vorhin besprochene unmittelbare Netzkopplung. Sie unterscheidet sich von jener grundsätzlich dadurch, dass als Zwischenenergieform ein Gleichstrom erzeugt wird, welcher wieder in Wechselstrom umgeformt wird, während bei der früher besprochenen Netzkopplung die Umformung von einer Frequenz auf die andere unmittelbar erfolgt.

Ich sagte oben, dass eine Hauptbedingung für die Gleichstrom-Drehstromumformung mit Hilfe des Elektronenrelais die Anwesenheit einer Synchronmaschine in dem gespeisten Drehstromnetz ist. Es lässt sich nun zeigen, dass eine solche Synchronmaschine über Elektronenrelais an das Gleichstromnetz angeschlossen und als Motor mechanisch belastet werden kann. Eine auf diese Weise angeschlossene Synchronmaschine kann somit ihre Leistung unmittelbar und ausschliesslich aus dem speisenden Gleichstromnetz aufnehmen. Ihre Drehzahl ist dann genau wie beim Gleichstrommotor

durch die ankommende Gleichspannung und durch die Konstanten der Maschine gegeben. Ein derartiger Motor arbeitet dann seinem Verhalten nach genau wie ein Gleichstrom-Kommutatormotor und kann als solcher je nach der Art der Erregung des Polrades Reihenschluss-, Nebenschluss- oder Compoundcharakteristik erhalten. Er unterscheidet sich vom normalen Gleichstrom-Kommutatormotor nur dadurch, dass der Kommutator durch ein Elektronenrelais ersetzt ist und dass im Gegensatz zum Kommutatormotor die Arbeitswicklung feststeht und das Feldsystem rotiert. Es ist auch ohne weiteres möglich, derartige Motoren über gewöhnliche Transformatoren an ein Gleichstromnetz anzuschliessen, aus dem einfachen Grund, weil es vollkommen gleichgültig ist, ob die in der Synchronmaschine durch die Rotation des Polrades erzeugte Wechselspannung unmittelbar oder aber mittelbar über einen Transformator an das Elektronenrelais gelegt und mit dem Gleichstromnetz verbunden wird. Dieser Frage der unmittelbaren Entnahme von mechanischer Energie aus einem Gleichstrom-Hochspannungssystem kommt insofern eine gewisse Bedeutung zu, als sie den unmittelbaren Anschluss von Pumpspeicher-Kraftwerken an eine Gleichstrom-Kraftübertragung auch bei Verwendung der Synchrongeneratoren als Motoren zum Antrieb der Speicherpumpen gestattet, ohne dass also der verfügbare Gleichstrom erst in Drehstrom umgeformt werden muss. Wir stellen somit fest, dass einer zukünftigen Gleichstrom-Hochspannungs-Uebertragungsleitung von beispielsweise 200 kV Uebertragungsspannung sowohl elektrische Energie in Form von Drehstrom beliebiger und regelbarer Frequenz als auch unmittelbar mechanische Energie über Transformatoren und Synchronmotoren normaler Bauart entnommen werden kann. In diesen beiden Fällen unterscheidet sich die zur Energieentnahme aus einem Gleichstromnetz erforderliche Ausrüstung gegenüber derjenigen zur Energieentnahme aus einem Drehstromnetz nur durch das Dazwischentreten des Elektronenrelais und der zugehörigen Steuerapparatur. Die Grundbedingung des Vorhandenseins einer Synchronmaschine in dem gespeisten Drehstromnetz wird praktisch in den meisten Fällen von vorneherein erfüllt sein. Auch die Frage einer «Europa-Sammelschiene» wird zukünftig auch vom Gesichtspunkte der Anwendung hochgespannten Gleichstromes zu diskutieren sein.

5. Der kommutatorlose Einphasenmotor mit beliebiger Charakteristik und beliebiger Frequenz.

Es wurde oben gezeigt, dass das Elektronenrelais die Möglichkeit gibt, durch statische Umformung aus Drehstrom der Frequenz 50 den für den Betrieb von Vollbahnen erforderlichen Einphasen-Wechselstrom der Frequenz $16\frac{2}{3}$ zu erzeugen. Diese Umformung auf eine niedrigere Periodenzahl ist vor allem mit Rücksicht auf die Triebmotoren in den Lokomotiven notwendig. Man kann aber die Frage stellen, ob sich denn nicht diese Umformung des vorhandenen Wechselstromes der Frequenz 50

überhaupt vermeiden liesse. Dies ist tatsächlich möglich, wenn man die Kommutatoren der Triebmotoren durch Elektronenrelais ersetzt, in ähnlicher Weise, wie wir dies im vorhergehenden Abschnitt beim ventilgesteuerten Gleichstrommotor gesehen haben. Denken wir uns anstelle der einzigen Statorwicklung zwei unter sich gleiche Wicklungen, die in denselben Nuten des Stators liegen und welche genau gleich mit dem Elektronenrelais verbunden und gesteuert werden. Solange die Summe der Ströme in den beiden Statorwicklungen genau dem Strom in der ursprünglichen gleichstromgespeisten Wicklung entspricht, ändert sich an der Wirkungsweise des Motors gar nichts, und dies gilt auch dann noch, wenn die beiden Wicklungen nicht gleichzeitig Strom führen, sondern abwechselungsweise. Diesen intermittierenden Strom in den beiden Statorwicklungen gewinnt man aber auf einfachste Weise dadurch, dass man die beiden Wicklungen an eine Einphasenwechselstromquelle legt,

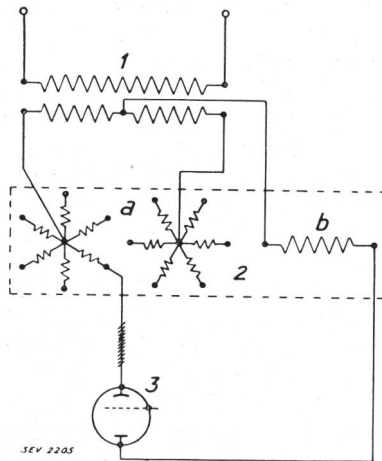


Fig. 14.

Prinzipschema des kommutatorlosen Einphasen-Serie-Motors.

- 1 Transformator.
- 2 Motor; a Statorwicklungen.
b Rotorwicklungen.
- 3 Gesteuerter Gleichrichter.

deren Mittelpunkt mit dem Elektronenrelais verbunden ist (Fig. 14). Infolge der Ventilwirkung des Elektronenrelais fliesst dann in jeder der beiden Statorwicklungen abwechselungsweise ein Strom, wobei die Summenwirkung beider Wicklungen in jedem Moment gleich der Wirkung der gleichstromdurchflossenen Statorwicklung bei einem ventilgesteuerten Gleichstrommotor ist. Wir haben auf diese Weise einen kommutatorlosen Einphasen-Wechselstrommotor gewonnen, der im übrigen alle Kennzeichen und alle Vorteile des gewöhnlichen Gleichstrommotors aufweist. Er unterscheidet sich also von diesem keineswegs in der Wirkungsweise, sondern ausschliesslich rein konstruktiv durch den Ersatz des Kommutators durch ein Elektronenrelais und durch die vertauschte Anordnung der Wicklungen im Stator und Rotor. Die Steuerung der Gitter des Elektronenrelais erfolgt dabei durch einen Kontaktapparat, der von der Welle des Rotors

aus mechanisch angetrieben wird. Das Elektronenrelais lässt sich dabei ausser zum Ersatz des Kommutators und zur Gleichrichtung des Stromes auch als Anlasser verwenden, so dass es in dieser Schaltung nicht weniger als drei für die Wirkungsweise des Motors sehr wesentliche Funktionen gleichzeitig ausübt. Das Anlassen eines derartigen Motors erfolgt dabei auf Grund seiner Speisung durch Wechselstrom ebenfalls mit Hilfe der gesteuerten Gitter nach dem Verfahren, das wir bei der Spannungsregulierung weiter oben betrachtet haben. Ein derartiger kommutatorloser Einphasenmotor arbeitet aus den obengenannten Gründen vollkommen unabhängig von der Frequenz des ihn speisenden Wechselstromnetzes. Er gestattet somit die unmittelbare Speisung mit Einphasenwechselstrom aus dem Allgemeinversorgungsnetz mit einer Frequenz von 50 oder 60. Damit ist endlich ein längst gehegter Wunsch aus dem Wunschzettel für die Elektrifizierung grosser Vollbahnnetze in Erfüllung ge-

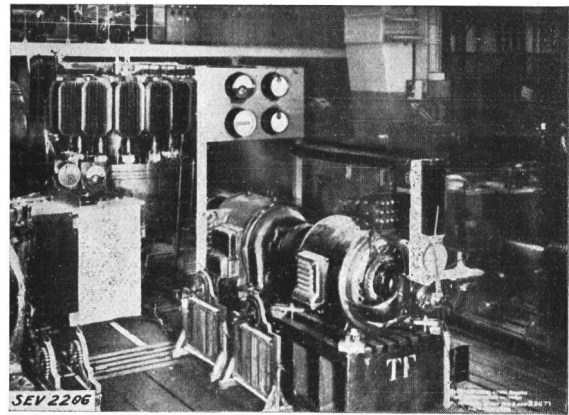


Fig. 15.

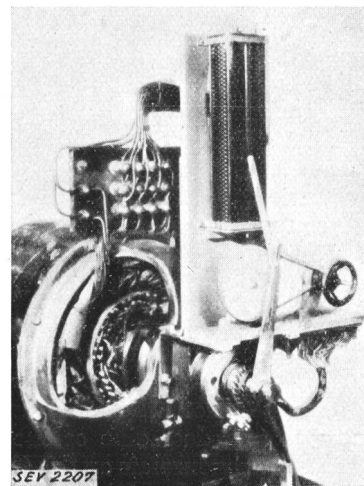


Fig. 16.

gangen. Ein derartiger ventilgesteuerter Einphasenmotor ist auch ohne weiteres imstande, bei geeigneter Erregung des Polrades als Generator auf den

Fahrdraht zurückzuarbeiten. Fig. 15 zeigt die erste Versuchsausführung eines derartigen ventilgesteuerten Einphasenmotors im Versuchsraum mit dem zugehörigen Gleichrichter als Steuerventil, Fig. 16 den Motor mit der angebauten Steuerung durch das rechts sichtbare Handrad. In diesem Zusammenhange kann mitgeteilt werden, dass eine Einphasenlokomotive für unmittelbare Speisung aus dem Allgemeinversorgungsnetz mit Einphasenstrom von 50 Per./s bei 15 000 V Fahrdrahtspannung zur Zeit bei der A.-G. Brown, Boveri & Cie. in Bau ist (Fig. 17). Die Maschine ist normalspurig, Achs-

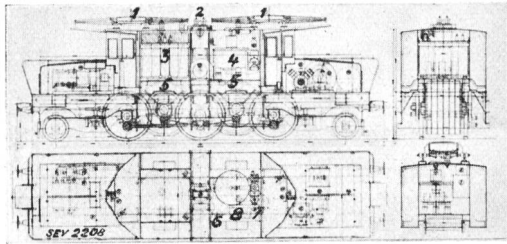


Fig. 17.

Aufbau einer Einphasen-Versuchslokomotive für Allgemeinnetz. — Frequenz 40 bis 60 Per./s mit ventilgesteuerten Einphasen-Triebmotoren.

- | | |
|------------------|-----------------|
| 1 Stromabnehmer. | 5 Triebmotoren. |
| 2 Hauptschalter. | 6 Steuerkopf. |
| 3 Transformator. | 7 Steuerung. |
| 4 Steuerventil. | 8 Kontaktgeber. |

folge 1 — C — 1, und wird mit zwei Motoren zu je 500 PS Stundenleistung für eine Maximalgeschwindigkeit von 90 km/h ausgerüstet. Die Lokomotive soll bei der Talfahrt auf den Fahrdraht zurückarbeiten. Diese Lokomotive ist gekennzeichnet durch das Fehlen aller Kommutatoren, Stufenschalter, Anfahrwiderstände und Wendeschalter im Motorenstromkreis. Alle diese Apparate sind ersetzt durch ein Elektronenrelais in der konstruktiven Gestalt eines Hochspannungsgleichrichters mit gesteuerten Gittern. Den Versuchen mit dieser Lokomotive muss im Hinblick auf die unmittelbare Verwertung der Energie aus den Allgemeinversorgungsnetzen mit Frequenz 50 für die zukünftige Elektrifizierung von Vollbahnnetzen eine grosse Bedeutung zuerkannt werden.

Zusammenfassend ergibt sich aus dem Gesagten, dass sich dem Elektronenrelais ein weites, noch nicht ganz überschaubares Verwertungsgebiet eröffnet. Nicht nur kann es eine Reihe von elektrischen Funktionen, die bisher mit Hilfe von Kommutatoren und andern mechanischen Schaltapparaten bewältigt wurden, viel vorteilhafter übernehmen, sondern es erschliessen sich damit der Elektrotechnik auch ganz neue Arbeitsmethoden. Diese sind begründet durch die Eigenschaften des Lichtbogens einerseits als Ventil mit einseitiger Sperrwirkung und als praktisch trägheits- und verschleissfreies Relais mit sehr grosser Empfindlichkeit andererseits. Die Entwicklung der für diese Anwendungen erforderlichen, übrigens sehr bescheidenen Apparatur ist zur Zeit im Gange. Wenn auch die Entwicklung des Elektronenrelais in der Richtung der

sehr hohen Leistungen und Spannungen sicherlich noch ganz beträchtliche Zeit und Arbeit beanspruchen wird, so darf immerhin mit der technischen Verwertung des Elektronenrelais in den nächsten Jahren gerechnet werden.

Diskussion.

Herr H. Hafner, Ingenieur der Maschinenfabrik Oerlikon, teilt mit, dass seine Firma seit einigen Jahren Versuche über verschiedene technische Anwendungen des gittergesteuerten Quecksilberdampfventiles macht; er zeigt zum Thema des Vortrages von Herrn Kern einige Oszillogramme, die an einer Versuchsanordnung zur statischen Transformierung des Gleichstromes aufgenommen worden sind und führt folgendes aus:

Die Gleichstromtransformierung wird in den Vordergrund treten, sobald die Energieübertragung auf grosse Distanz mit Hilfe des hochgespannten Gleichstromes zur Verwirklichung kommt. Der Gleichstromtransformator setzt sich zusammen aus dem umgekehrten Gleichrichter¹⁾ oder statischen Inverter (Rect-Inverter), der den Gleichstrom in

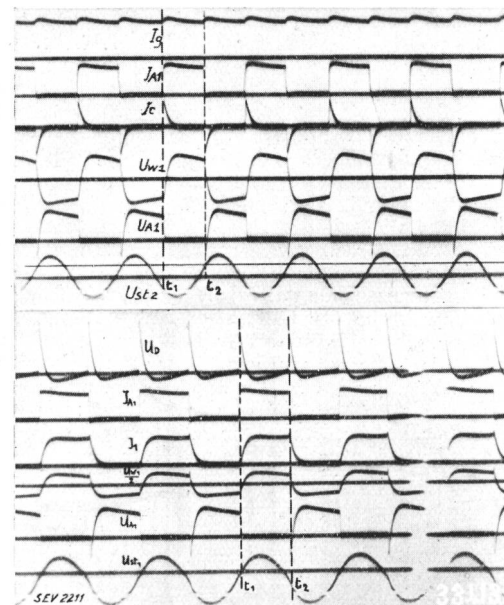
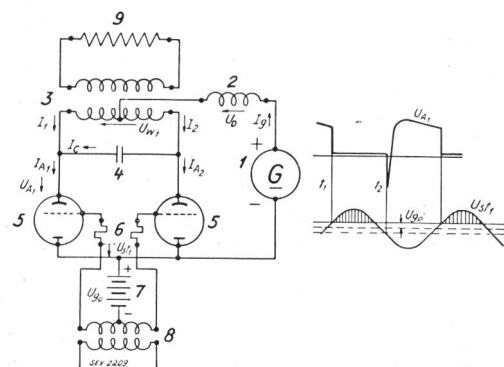


Fig. 18.

Schema der Versuchseinrichtung des «Inverters» (Gleichstrom-Wechselstromumformer) und daran aufgenommene Oszillogramme.

- | | |
|---|--|
| 1 Gleichstromquelle. | 6 Gitterwiderstände. |
| 2 Drosselspule. | 7 Gleichstromquelle für Gitterspannung. |
| 3 Transformator. | 8 Wechselstromquelle für Gitterspannung. |
| 4 Löschkondensator. | 9 Wechselstrombelastung (Ohmscher Widerstand). |
| 5 Gittergesteuertes Quecksilberdampfventil. | |

1) Prince, Gen. El. Review 1928, S. 347.

Wechselstrom umformt, aus dem Transformator und aus dem Gleichrichter zur Widerrichtung des Wechselstromes.

Fig. 18 zeigt das Schema des Inverters allein mit zwei gittergesteuerten einanodigen Ventilen. Der positive Pol der Gleichstromquelle ist über die Drosselspule D , die zur Konstanthaltung des Gleichstromes I_0 dient, mit dem Mittelpunkt der Primärwicklung des Transformators verbunden. Die Enden der Wicklung führen zu den Anoden der beiden Ventile. Die Kathoden sind unter sich verbunden und liegen am negativen Pol der Gleichstromquelle. Sekundärseitig ist der Transformator durch einen Ohmschen Widerstand belastet. Der Kathodenfleck beider Ventile ist konstant erregt. Die Steuerspannungen U_{St1} und U_{St2} der Gitter setzen sich zusammen aus einer gemeinsamen negativen Gittervorspannung U_{g0} und einer Wechselspannungskomponente. Die Wechselspannungskomponente des einen Gitters ist um 180° gegenüber derjenigen des andern verschoben. Die Amplitude ist etwas grösser als die Vorspannung, so dass die Gitter abwechselungsweise kurzzeitig positiv werden, wodurch abwechselungsweise die Anodenströme I_{A1} und I_{A2} gezündet werden. Das Bild zeigt zwei Aufnahmen mit einem Sechschleifen-Oszillographen.

Zur Zeit t_1 wird die Steuerspannung U_{St1} des Ventils 1 positiv; der Gleichstrom I_0 , der kurz vorher als Anodenstrom I_{A2} durch das Ventil 2 floss, fliesst jetzt als Anodenstrom I_{A1} durch das Ventil 1. Betrachtet man einen Zeitpunkt kurz vor t_2 , so ergibt sich folgendes Bild von der Arbeitsweise der Anordnung: Der Lichtbogen der Anode 1 brennt seit t_1 , die Anodenspannung U_{A1} hat den sehr kleinen Wert der Lichtbogenspannung (20 bis 30 V). Die Spannung vom Mittelpunkt der Primärwicklung zur Anode ist ungefähr gleich der Gleichspannung; die Spannung der ganzen Primärwicklung U_{w1} ist doppelt so gross; sie ist die Spannung zwischen den Anoden, die Spannung am Kondensator und, solange die Anode 1 durch den Lichtbogen mit der Kathode verbunden ist, auch die Anodenspannung des Ventils 2. Zur Zeit t_2 , eine halbe Periode nach t_1 , wird die Steuerspannung U_{St2} positiv. Der Lichtbogen des zweiten Ventils setzt sofort ein. Kurzzeitig brennen beide Lichtbogen; sie bilden mit dem geladenen Kondensator einen Kurzschlusskreis mit sehr kleiner Impedanz, in welchem die Kondensatorspannung gegen den Strom I_{A1} gerichtet ist. Die Folge ist, dass I_{A1} sofort abbricht, indem der Lichtbogen löscht. Gleichzeitig setzt I_{A2} voll ein. Mit dem Verlöschen des Lichtbogens an der Anode 1 springt die Anodenspannung auf den negativen Wert der Kondensatorspannung. Sie wird rasch wieder positiv, indem der Wicklungsstrom I_1 durch den Kondensator als Entladestrom bzw. Umladestrom I_c abklingt und den Kondensator umlädt. Im selben Masse wie I_1 abnimmt, setzt der Strom I_2 in der andern Wicklungshälfte ein, da der Gleichstrom durch die Drosselspule konstant gehalten wird. Während der relativ langsamen Kommutierung des Gleichstromes von der einen Wicklungshälfte in die andere geht die Leistungsabgabe an den Sekundärkreis durch Null. Die Leistungsabgabe der Gleichstromseite ist konstant, der Kondensator gibt während seiner Entladung ebenfalls Leistung ab. Die Differenz von zugeführter und sekundär verbrauchter Leistung wird in der Drosselspule aufgespeichert und kommt als positive Spitze der Spannung U_D an der Drosselspule zum Ausdruck. Die Wiederabgabe der aufgespeicherten Energie zeigt sich als negativer Spannungsabfall an der Drosselspule, d. h. als Spannungserhöhung des Transformatormittelpunktes.

Das Charakteristische der vorliegenden Anordnung besteht darin, dass die Gitter von aussen unabhängig vom Transformator gesteuert werden. Die Frequenz der Steuerspannung kann beliebig gewählt werden; sie ist taktgebend für den erzeugten Wechselstrom. Der Transformator ist normal ausgeführt, ohne Luftspalt. Der Kondensator ist so dimensioniert, dass im Moment des Löschens die negative Spitze der Anodenspannung etwas länger dauert als die Zeit, die zur Entionisierung der Umgebung des Gitters notwendig ist. Die Umladung des Kondensators geschieht sehr rasch, die Wechselspannung ist angenähert rechteckig, eine Form, die bei nachfolgender Gleichrichtung der Spannung erwünscht ist.

Es wurden Versuche mit verschiedenen Löschanordnungen gemacht. Beispielsweise wurde in den durch die Anoden mit der Primärwicklung gebildeten Kommutierungskreis eine

Hilfswchelspannung von der Frequenz des Taktgebers eingeführt, deren Phase relativ zur Steuerspannung so eingestellt werden kann, dass sie die Anodenströme löscht und gleichzeitig die Spannung am Transformator reguliert.

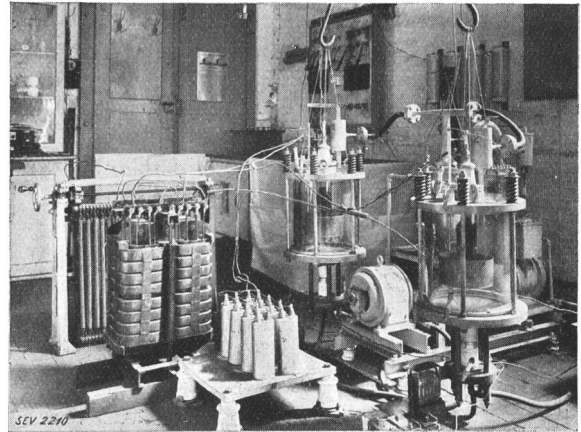


Fig. 19.
Versuchseinrichtung.

Fig. 19 zeigt die Versuchsanordnung mit den Ventilen, dem Transformator, dem Löschkondensator und einem Belastungswiderstand. Auffallend sind die langen Kathodenschilder; sie tragen ausserhalb im Niveau des Quecksilberspiegel ein sogenanntes Zündband, an welches hochgespannte Spannungstösse gelegt werden können zur Zündung des Erregerstromes oder auch zur direkten Zündung des Anodenstromes.

Die vollständige Schaltung des Gleichstromtransformators zeigt Fig. 20. An Stelle der Ohmschen Belastung des Inverters ist ein zweianodiger Gleichrichter getreten, die primäre Drosselspule ist als Saugdrosselspule ausgebildet, deren magnetisierende Ampèrewindungen durch den sekundären Gleichstrom kompensiert werden.

Fig. 21 zeigt dieselbe Anordnung, aber ohne Gittersteuerung der Anodenströme. Deshalb fehlt auch die konstante Erregung. Das periodische Einsetzen der Anodenströme wird dadurch erreicht, dass eine hochgespannte Wechselspannung über eine Funkenstrecke an das Zündband (kapazitive Zündeflektrode) gelegt wird. Bei jedem Spannungsschoss baut sich die Lichtbogenentladung über die Glimmentladung auf. Die Frequenz der Zündspannung ist beliebig einstellbar und taktgebend für den erzeugten Wechselstrom. Der Verlauf der Spannung und Ströme des Umformers ist gleich wie bei Gittersteuerung. Im Oszillogramm rechts ist durch eine gestrichelte Querlinie der Zündaugenblick des Ventils 2 festgehalten. Die Zündspannung U_{z2} setzt stossweise ein. Der Anodenstrom I_{A2} wird gezündet; er setzt voll ein, während der Anodenstrom I_{A1} gleichzeitig erlöscht. Die Bezeichnungen

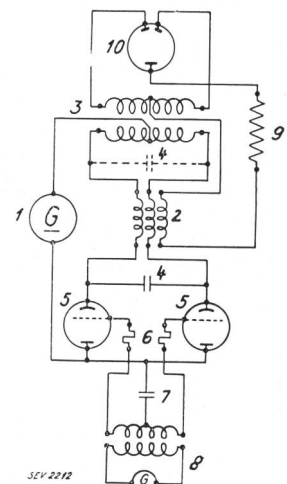


Fig. 20.

Schaltungsschema des „Gleichstromtransformators“.

- 1 Gleichstromquelle.
- 2 Kompensierte Saugdrosselspule.
- 3 Transformator.
- 4 Löschkondensatoren.
- 5 Gittergesteuertes Quecksilberdampfventil.
- 6 Gitterwiderstände.
- 7 Kondensator für negative Gittervorspannung.
- 8 Wechselstromquelle für Gittervorspannung.
- 9 Gleichstrombelastung.
- 10 Gleichrichter.

sind dieselben wie in Fig. 18. Charakteristisch ist wieder der angenähert rechteckige Verlauf der Wechselspannung U_{w1} . U_{g2} ist die transformierte Gleichspannung.

Die Zündbandzündung hat anfänglich Schwierigkeiten bereitet. Die Spannungsstöße gefährdeten den Kathodenisolator; ebenso traten in den Ventilen störende Schirmwirkungen auf, welche die periodische Zündung erschwerten. Die abgebildete Zündanordnung hat den Vorteil gegenüber

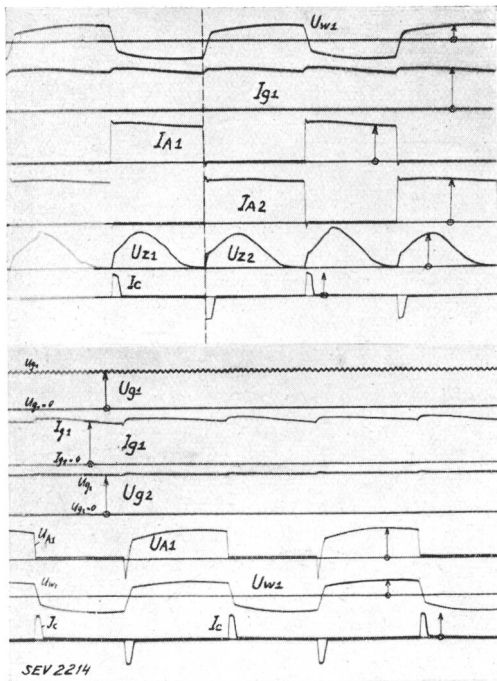
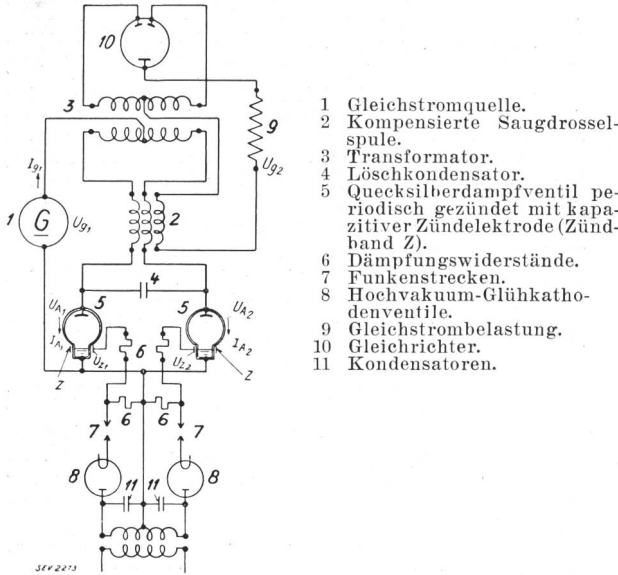


Fig. 21.

Schema der Versuchseinrichtung des „Gleichstromtransformators“. Quecksilberdampfventile mit kapazitiver Zünderlektrode, periodisch gezündet.

bekanntem Anordnungen, dass die Spannungsstöße den Kathodenisolator nur schwach beanspruchen. In Serie zur Funkenstrecke ist ein Ventil geschaltet, welches nur die positive Spannungswelle durchlässt. Dämpfungswiderstände verhindern das Auftreten von Schwingungen.

Gegenüber der Gittersteuerung hat die periodische Zündung mit kapazitiver Zünderlektrode den Nachteil der Be-

schränkung auf eine flüssige Kathode und auf eine einanodige Ausführung der Ventile. An Stelle der vielenanodigen Mehrphasenventile kann ein vielkathodiges Ventil mit einer Anode verwendet werden, bei welchem die Kathoden zeitlich nacheinander mit kapazitiver Zünderlektrode gezündet werden.

Demonstrationen in Baden.

Anschliessend an den Vortrag lud Herr Ing. M. Schiesser, Direktor der A.-G. Brown, Boveri & Cie., Baden, im Namen seiner Firma die Vertreter der Wissenschaft, der Elektrizitätswerke und der stromerzeugenden Gesellschaften ein, Vorführungen in den Versuchslokalen in Baden beizuwohnen, welche die verschiedenen Anwendungen der Gleichrichter mit gesteuerten Gittern zeigen und damit den Vortrag des Herrn Ing. Kern wirksam illustrieren sollten.

Am 12. September fanden sich ca. 80 Besucher im Konferenzsaal der Brown Boveri-Werke ein, wo Herr Direktor Schiesser eine kurze Einführung in das Versuchsprogramm mitteilte. Die unerwartet grosse Zahl der Interessenten machte die Einteilung in zwei Gruppen nötig, so dass ein Teil der Versuche zweimal vorgeführt wurde. Erst beim zweiten Teil konnten sich beide Gruppen zusammen in der grossen Montagehalle der Maschinenfabrik einfinden und gemeinsam den Vorführungen beiwohnen. Gezeigt wurden:

- die Regulierung der Gleichspannung,
- das Löschen von Rückzündungen durch den Gleichrichter selbst,
- das Unterbrechen von Kurzschlüssen im Gleichstromnetz ebenfalls durch den Gleichrichter,
- die Frequenzumformung, und zwar sowohl für starre wie für elastische Kupplung,
- die Umformung von Gleichstrom in Drehstrom,
- der Betrieb eines kollektorlosen, an das Gleichstromnetz angeschlossenen Motors, und zuletzt
- der Betrieb eines ventilgesteuerten kollektorlosen Einphasenmotors.

Diese Versuche wurde alle mit Einrichtungen vorgenommen, die den besonderen Bedürfnissen des Versuchstandes angepasst waren. Einige konstruktive Aenderungen werden notwendig sein, um den Betriebsbedingungen in den Elektrizitätswerken zu entsprechen. Immerhin muss gesagt werden, dass die Versuchsobjekte in der Leistung schon in den Bereich der industriell verwendbaren Einheiten gekommen sind, so dass man von Versuchen im Kleinen nicht mehr sprechen kann.

Ueberraschend einfach und sicher war die Regulierung mit einem kleinen Handrad des ventilgesteuerten kommutatorlosen Motors; gegenüber der heutigen Lokomotivsteuerung bedeutet dies eine gewaltige Vereinfachung. Mit welcher Zuversichtlichkeit die Brown-Boveri-Ingenieure die Zukunft dieser Einrichtung betrachten, zeigt die Tatsache, dass der Umbau einer früheren Simplon-Lokomotive nach diesen neuen Richtlinien in Angriff genommen ist. Sehr verheissungsvoll sieht auch die statische Netzkupplung zwischen Netzen gleicher oder verschiedener Frequenz aus. Es wäre ebenfalls ein sehr grosser Fortschritt, wenn man in absehbarer Zeit diese Netzkupplung ohne rotierende Maschinen verwirklichen könnte.

Diese gleiche Frequenzumformung wird das denkbar einfachste Verbindungsglied zwischen Allgemeinversorgungsnetzen und Bahnnetzen darstellen, wenigstens dort, wo der kommutatorlose Einphasenmotor, der auch mit Industriefrequenz läuft, die Schaffung eines besonderen Bahnnetzes nicht überhaupt überflüssig macht.

Die in Baden vorgeführten Versuche waren nicht nur ausserordentlich interessant; man nahm auch den Eindruck mit nach Hause, dass sich im Stillen etwas vorbereitet, das die Weiterentwicklung verschiedener Gebiete der Elektrotechnik grundlegend beeinflussen wird.

Beim von der Firma offerierten «Z'abig» im «Hotel du Parc» wurde das Gezeigte reichlich und angeregt kommentiert. Herr Direktor Leder von der Birsigtalbahn gab der allgemein empfundenen Anerkennung für das Gesehene in beredten Worten Ausdruck.