

Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins
Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke
Band: 24 (1933)
Heft: 13

Artikel: Ein Ausblick auf die Gleichstrom-Kraftübertragung der Zukunft
Autor: Kern-Berger, E.
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-1059525>

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: 22.01.2026

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

SCHWEIZERISCHER ELEKTROTECHNISCHER VEREIN

BULLETIN

REDAKTION:
Generalsekretariat des Schweiz. Elektrotechn. Vereins und des
Verbandes Schweiz. Elektrizitätswerke, Zürich8, 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

XXIV. Jahrgang

N° 13

Mittwoch, 21. Juni 1933

Ein Ausblick auf die Gleichstrom-Kraftübertragung der Zukunft.

Von E. Kern-Berger, Baden.

621.315.052

Der Autor bespricht einige Fragen aus dem Gebiet der Gleichstromübertragung. Er spricht die Ansicht aus, dass die Gleichstromkraftübertragung der Zukunft nicht mit konstantem Strom, sondern mit konstanter Spannung arbeiten werde. Sie wird keine Freileitung, sondern eine unterirdische Kabelanlage sein. Voraussichtlich wird nicht die Erde als «Rückleiter» dienen, sondern es wird ein Zweileitersystem mit über Ohmschen Widerstand geerdetem Nullpunkt verwendet werden.

Es werden dann die verschiedenen heute und in absehbarer Zukunft zur Verfügung stehenden Mittel zur statischen Umformung des Drehstromes in hochgespannten Gleichstrom und umgekehrt unter Berücksichtigung der Steuerung besprochen, nämlich Glühventile, Dampfventile und Dampfglühventile, Lichtbogenstromrichter nach Marx, Wellenstrahlgleichrichter nach Hartmann, und besonders die Eigenschaften der gittergesteuerten Ventile (Gleich- und Wechselrichter) erörtert. Zum Schluss kommen die Betriebsfragen zur Sprache: Kurzschluss, Blindleistungsverhältnisse und die für den Betrieb nötige Zubehör.

L'auteur traite quelques questions du transport d'énergie par courant continu. Il croit voir l'avenir de ce mode de transport non dans le système à intensité constante, mais dans celui à tension constante, utilisant un réseau de câbles souterrains et non des lignes aériennes. Le retour ne se fera pas par la terre, mais on se servira d'un système à deux conducteurs avec point neutre mis à la terre par l'intermédiaire de résistances ohmiques.

L'auteur esquisse ensuite les différents moyens actuels et futurs de transformation statique du courant triphasé en courant continu à haute tension et vice-versa, à savoir: les soupapes à cathode incandescente, les soupapes à vapeur de métal, les soupapes à cathode incandescente et à vapeur de métal, les redresseurs à arc selon Marx, les redresseurs à jet ondulé selon Hartmann et en particulier les soupapes à grille polarisée (redresseurs et alterneurs). L'article se termine par une étude des principaux problèmes d'exploitation: courts-circuits, puissance réactive et appareillage accessoire.

1. Historisches.

Wenn wir uns heute vierzig Jahre zurückdenken, in jene Zeit, als die Elektrotechnik als neuer Zweig des Maschinenbaues die ersten Schritte tat, dann machen wir die auf den ersten Blick seltsame Feststellung, dass damals und heute zwei einander ähnliche Fragen die Elektrotechniker beschäftigen. Damals wurde als erste technisch verwertete Stromart der Gleichstrom angewendet. Die stetige Vergrößerung des Versorgungsbereiches der so entstandenen Beleuchtungsanlagen führte zu dem Bedürfnis, grosse Bezirke von einer Generatorstation aus zu speisen. Auf der andern Seite setzte die damals durch die Kohlenfadenglühlampen nach oben begrenzte Spannung von ca. 100 V der Ausdehnung einer derartigen zentralen Stromversorgung enge Grenzen. Aus dieser Lage heraus wurde die Entwicklung des Wechselstromtransformators durch *Deri* und andere mit berechtigter Freude begrüsst. Der Tatsache, dass dieser Transformator als ruhender Umformer nun eine nahezu willkürliche Vergrößerung der von einem Kraftwerk gespeisten Gebiete ermöglichte und der kurz darauf folgenden Erfindung des Mehrphasenstromes und des Induktionsmotors ist es zu verdanken, dass sich der Wechselstrom in wenigen Jahren gegenüber dem Gleich-

strom durchsetzte. Es ist heute festzustellen, dass seither der Wechselstrom seine grossen Versprechungen voll und ganz gehalten hat. Wohl sind auch noch während der Entwicklung der Wechselstromtechnik in Südfrankreich und Oberitalien nach den Ideen des genialen Konstrukteurs *R. Thury* Kraftübertragungen mit hochgespanntem Gleichstrom gebaut worden, die zum Teil noch heute in anstandslosem Betrieb sind. Wir erinnern in diesem Zusammenhang nur an die Uebertragung *Moutiers-Lyon*, die über eine Distanz von ca. 450 km eine Leistung von ca. 20 000 kW mit einer Gleichspannung bis 125 kV überträgt und in stufenweisem Ausbau seit dem Jahre 1906 in dauerndem und durchaus erfolgreichem Betriebe ist ¹⁾.

Es ist indessen nicht zu verkennen, dass alle diese Gleichstromübertragungen mit Hilfe von Kommutatormaschinen (hierzu gehört im Grunde genommen auch der «*Highfield Transverter*») ²⁾, so genial sie auch durchdacht sind, bei den hohen Leistungen, mit denen heute zu rechnen ist, infolge der beschränkten Leistung und Spannung pro Maschineneinheit ganz wesentlich komplizierter

¹⁾ Thury, Bull. SEV 1930, Nr. 5, S. 159.

²⁾ Siehe Seite 293.

und teurer im Aufbau sind, als eine gleichwertige Drehstromanlage³⁾).

Nun hat in erster Linie die Einfachheit der Erzeugung und der Transformation dem Wechselstrom zum Siege verholfen. Je länger, desto offener sagt man aber dem Wechselstrom nach, dass er bei den heute zu übertragenden Leistungen unverkennbare Ungezogenheiten offenbart, die mit der Grösse der Leistung und der Uebertragungsdistanz immer stärker hervortreten und auch immer unbequemer werden. Als Stromart für die Uebertragung sehr grosser Leistungen auf grosse Distanzen steht auch der Wechselstrom nur gerade noch solange unbestritten da, als ihm sein Rivale, der Gleichstrom, in bezug auf Wirtschaftlichkeit und Zuverlässigkeit der Umformung und etwa noch in der Beherrschung der Ueberströme nicht einigermassen ebenbürtig zur Seite tritt. Umgekehrt hat der Gleichstrom als Stromart für die Energieübertragung in den vergangenen vierzig Jahren gewissermassen Entlastungsmaterial gesammelt und bereitet sich nun vor, mit einer gewissen Ironie den Wechselstrom gerade unter den extremsten Verhältnissen in der Kraftübertragung aus dem Feld zu schlagen und die vor vierzig Jahren erlittene Niederlage einigermassen wettzumachen. Lediglich an der bisherigen Unmöglichkeit der statischen Umformung des Gleichstromes in den für die Verteilung und für den Verbrauch ungleich bequemerem Drehstrom ist seine Verwendung für die Grosskraftübertragung auf grosse Distanzen bisher gescheitert. Der Gleichstrom fällt somit in dem Moment in den Bereich ernsthafter Betrachtung, wo die Umformung von Drehstrom in Gleichstrom und umgekehrt mit den erforderlichen Spannungen und Einheitsleistungen möglich wird.

Es muss hier ausdrücklich betont werden, dass es sich niemals darum handeln kann, den Gleichstrom als Stromsystem etwa von der Stromquelle bis hin zum Stromverbraucher wieder einzuführen. Sowohl für die Erzeugung als auch für die Verteilung und für den Verbrauch ist auch heute noch der Drehstrom dem Gleichstrom im allgemeinen weit überlegen. Der Gleichstrom wird auch in Zukunft nur als Zwischenglied die ganz grossen Entfernungen überbrücken. Es muss somit am Anfang der Uebertragungsleitungen der in den Drehstromkraftwerken erzeugte Drehstrom in Gleichstrom und am Ende der Uebertragungsleitung der Gleichstrom wieder in Drehstrom umgeformt werden. Diese Beschränkung des Gleichstromes auf die Fernübertragung selbst muss hervorgehoben werden, denn wenn auch heute die statische Transformation des Gleichstromes in Gleichstrom oder Drehstrom möglich ist, so ist und bleibt sie immer noch teurer und umständlicher als die Transformation von Wechselstrom. Die Anwendung des Gleichstromes als Zwischenglied ist somit nur gerade da gerechtfertigt, wo der Mehraufwand für die Transformation durch

die Einsparung an der Uebertragungsleitung und in den Uebertragungsverlusten mindestens ausgeglichen wird.

Die vorliegende Betrachtung will keinerlei Anspruch auf Vollständigkeit erheben; sie soll nur einige der mit der Gleichstromübertragung zusammenhängende Fragen herausgreifen und versuchen, diese den heutigen Anschauungen gemäss zu beantworten.

2. Das Uebertragungssystem.

Wir haben vorerst zu der Frage Stellung zu nehmen, ob die zukünftige Gleichstromkraftübertragung mit konstanter Spannung oder mit konstantem Strom arbeiten wird. Wenn auch zuzugeben ist, dass eine Gleichstrom-Kraftübertragung mit konstantem Strom nicht zu unterschätzende Vorteile bietet, so wird trotzdem nach heutigem Ermessen die zukünftige Gleichstromkraftübertragung mit konstanter Spannung erfolgen. Es zeigt sich, dass die im andern Fall notwendige statische Umformung von Drehstrom konstanter Spannung auf Gleichstrom konstanten Stromes und umgekehrt infolge von teilweise einander widersprechenden Forderungen heute unseres Wissens noch nicht möglich ist. Diese heutige Stellungnahme bedeutet indessen noch keineswegs einen freiwilligen Verzicht auf die Vorteile des Konstantstromsystems; vielmehr ist sie von dem Fehlen einer technischen Lösung des damit verbundenen Umformungsproblems diktiert. Es ist abzuwarten, ob und wann eine brauchbare Lösung gefunden wird. Zwar wird man voraussichtlich zur Gewinnung der erforderlichen Uebertragungsspannung auch die Reihenschaltung einzelner Aggregate verwenden müssen. Trotzdem aber soll dabei nicht der Strom, sondern die Uebertragungsspannung im wesentlichen konstant gehalten werden, im Gegensatz zum Uebertragungssystem nach Thury.

Was die Art der Uebertragungsleitung selbst anbetrifft, so ergibt ein Vergleich zwischen Freileitung und Kabel eine ganze Reihe von gewichtigen Argumenten zu Gunsten des unterirdisch verlegten Kabels. Es sprechen vor allem der billigere Unterhalt, die wesentlich höhere Betriebssicherheit sowie die Unzugänglichkeit gegenüber atmosphärischen Ueberspannungen zu Gunsten der Kabelleitung. Die heute schon offenkundige Möglichkeit, einadrige Gleichstromkabel für Gleichspannungen von 200 kV und darüber herzustellen, ist vor allem dem wichtigen Umstand zu verdanken, dass das Kabeldielektrikum beim Gleichstromkabel infolge der verschwindend kleinen Ladeströme in weit geringerem Masse als beim Wechselstromkabel beansprucht wird. Diese soeben genannten Argumente werden voraussichtlich trotz des etwas höheren Preises den Ausschlag zu Gunsten der unterirdischen Kabelleitung geben.

Thury hat in einer Beschreibung seines Gleichstromsystems die Frage der Verwendung der Erde als Rückleiter aufgeworfen und dieselbe positiv empfohlen, mit dem Hinweis, dass man dadurch

³⁾ E. Schjölberg-Henriksen, Comptes rendus des travaux de la 6^{me} session de la Conf. Int. des Grands Réseaux 1931, Bd. 1, Rapport Nr. 104.

eine Leitung glatt ersparen könne⁴⁾). Wenn man die Annahme anerkennt, dass die Höhe der Uebertragungsspannung in erster Linie durch die Spannung der Aussenleiter gegen Erde nach oben begrenzt ist, so bietet die Verwendung der Erde als Rückleitung eines Zweileitersystemes keine Vorteile, und zwar aus dem einfachen Grunde, weil dadurch die eigentliche Uebertragungsspannung gleich der Spannung gegen Erde wird. Während somit unter den genannten Annahmen unter Zugrundelegung einer gegebenen Stromdichte im Kabelleiter der Kupferaufwand und damit auch der Wirkungsgrad des Kabels im Zweileitersystem mit der Erde als Rückleitung gleich demjenigen beim Zweileitersystem mit geerdetem Mittelpunkt ist, kommt im ersten Falle noch der Spannungsabfall in der Erde als Rückleitung hinzu. Anders liegt die Sache dann, wenn die Uebertragungsspannung durch andere Argumente als die genannten festgelegt wird, so dass diese gegebene Uebertragungsspannung gleich der Spannung einer Leitung gegen Erde gesetzt werden kann. Während also im ersten Falle die Verwendung der Erde nachteilig wirkt, kann sie im zweiten Falle unleugbare Vorteile in den Baukosten und im Wirkungsgrad der Leitung bringen. Indessen scheinen aber nach heutigem Ermessen die erstgenannten Argumente den Ausschlag zu geben, so dass voraussichtlich das Zweileitersystem mit über Ohmschen Widerstand geerdetem Nullpunkt den Anforderungen am besten entsprechen wird.

Ueber den Wirkungsgrad der Uebertragung lässt sich allgemein nur sagen, dass dieser schon unter Voraussetzung ähnlicher Betriebsspannungen gegen Erde gegenüber dem Wirkungsgrad einer Drehstromleitung im Vorteil ist. Berücksichtigt man ferner die schon heute erkennbare Möglichkeit, mit der Uebertragungsspannung bei Gleichstrom höher zu gehen als bei Drehstrom und die weitere Tatsache, dass bei der Gleichstromübertragung überhaupt nur die Wirkleistung im Spiel und keine Blindleistung zu übertragen ist, so ergibt sich eine ganz eindeutige Ueberlegenheit im Wirkungsgrade zu Gunsten der Gleichstromkraftübertragung.

3. Die Umformung.

Für die statische Transformation von Drehstrom in Gleichstrom und umgekehrt ist nun der Elektrotechnik in den letzten Jahren ein hoffnungsvoller Helfer erwachsen⁵⁾). Vor zwanzig Jahren erst ein bescheidenes Laboratoriumsgerät, ist er heute im Begriffe, ein wertvolles und in seiner Wirkungsweise äusserst elegantes Hilfsmittel zu werden. 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 Millionstel Millimeter Quecksilbersäule. Gegenüber diesen Hochvakuum-Glühkathodenröhren unterscheiden sich die dampf- oder gasgefüllten Entladungsapparate insofern, als sie bei viel geringeren Verlusten nur eine stark beschränkte Steuerfähigkeit aufweisen. Zu diesen gas- oder dampfgefüllten Entladungsapparaten zählen der Quecksilberdampfgleichrichter sowie auch die in letzter Zeit aufgetauchten gas- oder dampfgefüllten Glühkathodenröhren, bei denen der Gas- und Dampfdruck Werte von der Grössenordnung einiger Tausendstel Millimeter Quecksilbersäule erreicht. Die hier zu besprechenden Anwendungen von gesteuerten Entladungsapparaten lassen sich, rein physikalisch betrachtet, sowohl mit reinen Hochvakuumglühkathodenröhren, als auch mit gas- oder dampfgefüllten Apparaten durchführen. Im folgenden sollen diese Apparate, welche durch die Haupteigenschaften der Sperrung des Stromes in der einen Richtung und der zeitlichen Verschiebung des Beginnes der Entladung an den Anoden mit Hilfe der Steuergitter gekennzeichnet sind, kurz als *Ventil* bezeichnet werden. Das Ventil als elektrotechnischer Begriff kann dann vom physikalischen Gesichtspunkt aus ein Glühkathodenventil ohne oder mit Dampffüllung, oder ein Quecksilberdampfventil mit Quecksilberkathode sein. Die Frage, welcher von den genannten Typen die Zukunft gehören wird, lässt sich heute unseres Erachtens noch nicht mit Bestimmtheit beantworten; wir werden zu den Aussichten der drei Ventiltypen noch Stellung nehmen. Die vorliegenden grundsätzlichen Ueberlegungen sind übrigens für alle Ventiltypen gemeinsam.

Von wesentlicher Bedeutung ist nun die Tatsache, dass die hier zu besprechenden Anwendungen der Ventile auf die genannte Eigenschaft der stetigen Beeinflussung des Anodenstromes durch das Steuergitter keinerlei Anspruch machen. Im Gegenteil: Es lässt sich nachweisen, dass für alle Anwendungen von Ventilen, in denen der Wirkungsgrad des Apparates eine massgebende Rolle spielt, die von gewissen Ventiltypen gebotene Möglichkeit der stetigen Steuerung des Anodenstromes mit Hilfe des Steuergitters nicht verwertet werden darf. Dies ist leicht verständlich, wenn man bedenkt, dass eine Modulation des Stromes in dem erforderlichen Masse mit Hilfe des Ventils als Modulator nur dann auftreten kann, wenn die Spannung am Ventil während des Stromdurchganges zeitweise von gleicher Grössenordnung wie die Betriebsspannung selbst ist. Das Verhältnis der Spannung an dem stromführenden Ventil zur Betriebsspannung ist aber seinerseits wieder massgebend für den Wirkungsgrad des Umformers. Derartig unzulässige Umformungsverluste können nur dann vermieden

⁴⁾ Thury, Bull. SEV 1930, Nr. 5, S. 176.

⁵⁾ Kern, Neue Anwendungen des gesteuerten Gross-Gleichrichters, Bull. SEV 1931, Nr. 22, S. 533.

werden, wenn zu jeder Zeit entweder die Spannung am oder der Strom im Ventil gegenüber der Betriebsspannung und dem Betriebsstrom vernachlässigbare Werte annehmen. Dies trifft aber nur dann zu, wenn der Widerstand des Ventils entweder nahezu verschwindet oder praktisch unendlich wird. Für technische Anwendungen mit hohem Wirkungsgrad darf somit das Ventil niemals als Modulator, sondern nur gewissermassen als Schalter verwendet werden, in welcher Eigenschaft es entweder einen Stromkreis möglichst widerstandslos schliesst oder aber unter Einsatz eines möglichst hohen Widerstandes öffnet.

Nun müsste auch noch nach diesem ausgesprochenen Verzicht auf die Eigenschaft der stetigen Beeinflussung des Anodenstromes durch das Steuergerät auf den ersten Blick das reine Glühkathodenventil, im folgenden als *Glühventil* bezeichnet, allein für die Umformung einer Stromart auf die andere in Betracht kommen. Dies um so mehr, als es ja theoretisch ausser zur eigentlichen Umformung noch zu anderen und gerade bei der Leistungsübertragung durch hochgespannten Gleichstrom äusserst wichtigen Anwendungen Hand bietet. Seine Eigenschaft, den Anodenstrom mit Hilfe der Gitter in jedem beliebigen Zeitpunkt unterbrechen zu können, ermöglicht theoretisch seine Anwendung sowohl als eigentlicher Hochspannungsgleichstromschalter, sowie auch als Phasenkompensator. Diesen ausgezeichneten Eigenschaften steht aber ein verhältnismässig grosser Spannungsabfall von vielen 100 V zwischen Anode und Kathode und eine beschränkte Lebensdauer von der Grössenordnung von höchstens 1 bis 2 Betriebsjahren gegenüber. Im Gegensatz zum Quecksilberdampfventil, im folgenden *Dampfventil* genannt, eignet sich heute das Glühventil in erster Linie zur Steuerung von kleinen Strömen von der Grössenordnung bis zu 100 A bei sehr grossen Spannungen bis zu einigen hundert kV. Zu den vorgenannten beiden Ventiltypen ist noch eine Zwischentype hinzugekommen, welche sich vom reinen Glühventil durch die Anwesenheit einer Dampfzuführung unterscheidet und auch hinsichtlich Steuerfähigkeit und Wirkungsgrad dem Dampfventil ungefähr gleichzustellen ist. Wir bezeichnen dieses Ventil im folgenden als *Dampfglühventil*. Dieses hat, wenn auch in weniger hohem Grade, mit dem Glühventil den Nachteil einer sehr beschränkten Lebensdauer der Glühkathode gemeinsam. Vom physikalischen Standpunkt aus gesprochen ist bei den hier in Frage kommenden hohen Spannungen das Dampfglühventil dem Ventil mit flüssiger Kathode vielleicht insofern überlegen, als sich bei ihm die Dampfdrucke der eingeführten (Quecksilber-) Dampfzuführung in höherem Grade als beim Ventil mit flüssiger Kathode den hinsichtlich der Betriebssicherheit günstigeren Bedingungen anpassen lässt. Diesem Nachteil des Dampfventils gegenüber steht indessen der Vorteil einer unvergleichlich einfacheren Konstruktion und höheren Lebensdauer der Kathode. Ueber die endgültigen Aussichten der verschiedenen Ventiltypen

entscheiden letzten Endes die Fragen, ob sich bei Anwendung der flüssigen Kathode die Dampfdruckverhältnisse genügend beherrschen lassen und ob andererseits die Lebensdauer der Glühkathode im Glühventil auf einen wirtschaftlich brauchbaren Wert gebracht werden kann.

Ausser den genannten Ventiltypen, in welchen der Stromdurchgang durch einen hochevakuierten Raum erfolgt, sind in letzter Zeit auch Versuche mit unter höherem Druck brennendem Lichtbogen gemacht worden, welcher durch elektromagnetische Blasung zwischen künstlich gekühlten Elektroden rotiert und wobei sowohl die düsenförmigen Elektroden, als auch der Lichtbogen selbst durch expandierende Pressluft bestrichen und gekühlt werden. Die periodische Zündung der Lichtbogen erfolgt hierbei mit Hilfe von besonders erzeugten Ueberspannungsimpulsen⁶⁾. Die eigentliche Hauptschwierigkeit liegt vermutlich auch hier in der sicheren Beherrschung des Lichtbogens bei hohen Leistungen. Anhand der bisherigen Veröffentlichungen muss damit gerechnet werden, dass trotz dem verhältnismässig beträchtlichen Kosten- und Leistungsaufwand für die Hilfsbetriebe (Kompressoren und Rückkühler für die Pressluft, Zündung der Lichtbogen, Erregung der Blasfelder) auch dieser «Ueberdruck-Stromrichter» für eine zukünftige Gleichstrom-Kraftübertragung in den Bereich ernsthafter Betrachtung fällt⁷⁾.

Weniger lässt sich über die Eignung des in den letzten Jahren entwickelten Quecksilberwellenstrahlgleichrichters⁸⁾ für die Gleichstromkraftübertragung aussagen. Derselbe ist unseres Wissens in einigen wenigen Versuchsexemplaren für Spannungen unterhalb 1000 V als Gleichrichter in Betrieb; irgendwelche Versuchsergebnisse für höhere Spannungen sind unseres Wissens nicht bekannt.

Wir werden daher im folgenden unsere Ueberlegungen unter Annahme der Verwendung gittergesteuerter Ventile durchführen.

Für die Umformung selbst werden wir uns also nur derjenigen Eigenschaft des gesteuerten Lichtbogens bedienen, die darin besteht, dass auch bei positiver Anode der Stromdurchgang durch ein der Anode vorgelagertes negativ geladenes Steuergerät verhindert werden kann. Mit anderen Worten: Eine Anode kann nur dann zünden, wenn nicht nur die Anode selbst, sondern auch die zugehörige Steuerelektrode gleichzeitig positiv ist. Sobald der Lichtbogen an einer Anode brennt, wird bei den gas- oder dampfgefüllten Ventilen durch den Einfluss der Entladung selbst die Wirkung des Gitters stark abgeschwächt und diese genügt dann nicht mehr, um irgendwelche nennenswerten Leistungen zu modulieren oder gar zu unterbrechen. Das Ventil kann somit gewissermassen als hochempfindliches trägheitsloses Relais betrachtet werden. Es ist bekannt, dass es gewisse hochempfindliche, me-

⁶⁾ Marx, Lichtbogen-Stromrichter für sehr hohe Spannungen und Leistungen. Verlag Springer 1932.

⁷⁾ Vergl. Bull. SEV 1933, Nr. 12, S. 270.

⁸⁾ Hartmann, Z. techn. Physik 1931, Heft 1, S. 4, und Bull. SEV 1932, Nr. 14, S. 352.

chanische 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 Kontaktvorrichtung.

Wir haben festgestellt, dass es sich nur darum handeln wird, den in den Kraftwerken erzeugten Drehstrom einmal in Gleichstrom und den dem Verbrauchszentrum zugeführten, hochgespannten Gleichstrom wieder in Drehstrom umzuformen. Während die Drehstrom-Gleichstrom-Umformung mit Hilfe des bekannten nicht gesteuerten Gleichrichters möglich ist, erweist sich für die statische Gleichstrom-Drehstrom-Umformung die Anwendung des Ventils als unumgänglich notwendig. Im Gegensatz zum Gleichrichter wollen wir nun das Steuer Ventil am andern Ende der Uebertragungsleitung entsprechend seiner technischen Anwendung, in welcher es Gleichstrom in Wechselstrom umformt, kurz als *Wechselrichter* bezeichnen. Wir wollen auch der Kürze halber das leistung abgebende Drehstromnetz, das primäre Netz, das leistungsaufnehmende Drehstromnetz, das sekundäre Netz nennen. Als weitere allgemeine Bedingung für eine derartige Umformung ist sodann die Mitwirkung einer Synchronmaschine oder von statischen Kondensatoren in dem vom Umformer gespeisten Drehstromnetz zu nennen. Es soll hier nur eine Erläuterung desjenigen Verfahrens gegeben werden, welches mit Hilfe von Synchronmaschinen arbeitet. Dies ist um so eher ausreichend, als die beiden genannten Verfahren sich nicht in der Arbeitsweise, sondern nur in den Hilfsmitteln voneinander unterscheiden. Diese nun beim ersten Verfahren für die Gleichstrom-Drehstrom-Umformung erforderliche Synchronmaschine kann dabei gleichzeitig eine der drei möglichen bekannten Normalfunktionen erfüllen, nämlich als Synchrongenerator, als Synchronmotor oder als Synchronphasenschieber. Weder die Schaltung noch die Arbeitsweise einer derartigen Synchronmaschine unterscheidet sich bei ihrer Verwendung als Taktgeber bei der Gleichstromdrehstromumformung irgendwie von der normalen Synchronmaschine. Die Synchronmaschine spielt im Zusammenhang mit dem eigentlichen Gleichstromdrehstromumformer, bestehend aus Transformator, Wechselrichter und Steuerapparat, die Rolle des Taktgebers, indem sie die Frequenz des sekundären Wechselstromnetzes festlegt.

Wir setzen der Einfachheit halber voraus, dass wir ein sekundäres Drehstromnetz vor uns haben, welches in bekannter Weise auch durch Drehstromsynchrongeneratoren gespeist wird. Wenn wir die elektrische Leistung aus dem Gleichstromnetz ins Drehstromnetz übertragen wollen, so muss der aus dem Gleichstromsystem kommende Strom der von den Generatoren erzeugten Eigenspannung des Drehstromnetzes entgegengerichtet sein, ähnlich wie der einem Gleichstrommotor zufließende Strom der von ihm selbst erzeugten Gegen-EMK entgegengerichtet sein muss. Wir schliessen nun gemäss

Fig. 1 an das Drehstromnetz einen Transformator an, dessen Sekundärwicklung nun also mit dem Drehstromnetz und dessen in Stern geschaltete Pri-

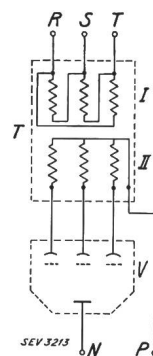


Fig. 1.

- | | |
|-------|--|
| I | Sekundärwicklung des Transformators T. |
| II | Primärwicklung des Transformators T. |
| V | Ventil. |
| N P | Gleichstrom-Netz. |
| R S T | Drehstrom-Netz. |

märwicklung mit den Anoden eines Ventils verbunden ist, während der Sternpunkt mit dem Plusleiter und die Kathode des Ventils mit dem Minusleiter des Gleichstromsystems verbunden sind. Wir werden nun zeigen, wie man durch zyklische Verbindung der aufeinanderfolgenden Phasen der Dreiphasenwicklung mit dem Gleichstromnetz zu einem kontinuierlichen Stromübergang aus dem Gleichstromnetz in das Drehstromnetz gelangt. Betrachten wir uns die Spannungskurve des Drehstromnetzes Fig. 2 und denken uns gewissermassen einen intermittierenden Parallelbetrieb des Gleichstromnetzes mit den Generatoren im sekundären Drehstromnetz, indem wir die einzelnen Phasen des Wechselstromtransformators nacheinander in denjenigen Abschnitten der Spannungskurve mit dem Gleichstromnetz verbinden, in welchen ihre Eigenspannung der ankommenden Gleichspannung ungefähr gleich und entgegengerichtet ist. Um einen fortlaufenden Stromübergang zu erhalten, werden wir die Dauer dieses Parallelbetriebes jeder Phase mit dem Drehstromnetz mindestens gleich dem Phasenwinkel $\frac{2\pi}{3}$ der aufeinanderfolgenden Phasen

machen, so dass sich die aufeinanderfolgenden Phasen gegenseitig in gleichen Zeitabständen ablösen.

Die passende Wahl des Punktes der Wechselspannungskurve, in welchem die Verbindung einer Wicklung des Transformators durch das Ventil mit dem Gleichstrom-Minuspol hergestellt wird, lässt sich nun eben mit Hilfe der Steuergitter an den Anoden bequem durchführen. Dieser Wahl des Zündpunktes sind mit Rücksicht auf den vom Umformer aufgenommenen Blindstrom enge Grenzen gezogen. Die Ablösung zweier unmittelbar nacheinander brennenden Anoden erfolgt gemäss Fig. 2 mit Hilfe der Gitter in einem Zeitpunkt, wo der Momentanwert der Wechselspannung der neu zündenden Anode noch kleiner ist als derjenige der schon brennenden Anode. Die Zündung erfolgt mit Hilfe eines kurzen, positiven Spannungsimpulses auf das Gitter, während dieses Steuergitter im allgemeinen negativ geladen ist und während dieser Zeit den Stromdurchgang durch die Anode sperrt.

Der Verlauf der Gitterspannungen u_{s1} , u_{s2} , u_{s3} ist in Fig. 2 durch strichpunktierte Linien dargestellt. Sobald infolge dieses positiven Spannungsimpulses

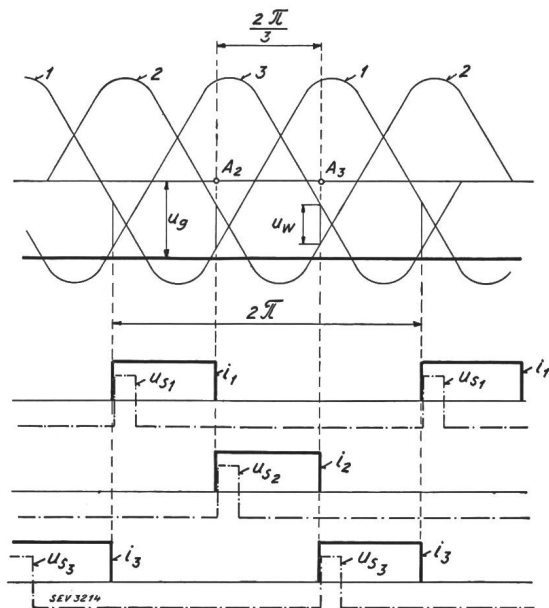


Fig. 2.

- 1, 2, 3 Spannungskurven der 3 Primärphasen.
 i_1, i_2, i_3 Stromkurven der 3 Primärphasen.
 u_g Gleichspannung des Gleichstrom-Netzes.
 u_w Wendespannung.
 u_{s1}, u_{s2}, u_{s3} Steuerspannungen der Steuergitter im Ventil.

eine Anode zündet, wird durch die Spannung u_w , welche zwischen dieser neu zündenden Anode und der bisher brennenden Anode herrscht, der Strom von der brennenden Anode in die neu zündende Anode hinübergedrängt, so dass die brennende Anode löscht und die neu gezündete Anode während eines bestimmten Bruchteils einer Periode den gesamten Strom führt. Die Richtung der Spannungen während des Stromüberganges von einer Anode auf die nächstfolgende ist in Fig. 3 durch entsprechende Pfeile veranschaulicht. Diese bei der Umschaltung des Lichtbogens von einer Anode auf die nächstfolgende vorhandene Spannungsdifferenz u_w wird als «Wendespannung» bezeichnet. Sie ist abhängig von der Wahl des Zündpunktes der Anoden und massgebend für den richtigen Gang der Umformung. Nach Ablauf einer Anodenbrenndauer wiederholt sich derselbe Vorgang an der nächstfol-

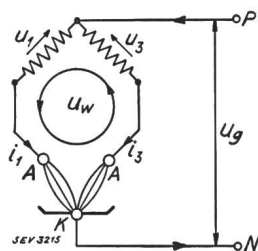


Fig. 3.

- u_1, u_3 Unverkettete Spannung der Phase 1 bzw. 3.
 u_w Wendespannung.
 K Kathode.
 A Anode des Ventils.
 u_g Gleichspannung des Gleichstrom-Netzes.
 i_1, i_3 Phasenströme.

genden Anode, so dass je während einer Periode alle Anoden nacheinander einmal brennen. Somit fließen im Normalbetrieb aus dem Gleichstromnetz

stetig aufeinanderfolgende gegenseitig sich überlappende Stromimpulse nacheinander in die einzelnen Phasen des Drehstromnetzes. Als wichtige Bedingung für den kontinuierlichen Betrieb ist zu beachten, dass der Zündpunkt A (Fig. 2) eine gewisse minimale Voreilung gegenüber dem Schnittpunkt der Spannungskurve zweier Nachbarphasen haben muss. Wenn diese Bedingung nicht erfüllt ist, kann der Lichtbogen an einer Anode nicht mehr vollständig löschen, was einen vollständigen Kurzschluss des Gleichstrom- und des Wechselstromnetzes bedeutet. Wir kommen später auf diesen Kippvorgang des Wechselrichters zurück.

Durch passende Einstellung des Zündpunktes A der Anoden mit Hilfe eines besonderen Apparates kann die durchgehende Leistung bis zum Leerlauf stetig reguliert werden. Einer zeitlichen Verschiebung des Zündpunktes entspricht eine Verminderung der Gegenspannung des Wechselstromnetzes während der Brenndauer einer Anode. Infolgedessen wächst die vom Wechselstromnetz aus dem Gleichstromnetz bezogene Wirkleistung und umgekehrt. Dasselbe geschieht, wenn die Wechselspannung des Sekundärnetzes selbst abnimmt. Es folgt daraus, dass die Leistungsregulierung bei der Gleichstromdrehstromumformung hinsichtlich der aus dem Gleichstromnetz in das sekundäre Drehstromnetz übertragenen Leistung mit Hilfe der Spannung allein erfolgt. Oder also: Die Leistungsregulierung erfolgt genau wie bei parallel arbeitenden Gleichstrommaschinen.

Diese Umformung von Gleichstrom in Drehstrom geht in bezug auf Leistungsfaktor, Strom- und Spannungsverlauf, Verzerrung der Stromkurve usw. im wesentlichen unter denselben Verhältnissen vor sich, wie die Umformung von Drehstrom in Gleichstrom im normalen Gleichrichter. Ist im sekundären Drehstromnetz keine Wechselspannung und keine Synchronmaschine überhaupt vorhanden, so können an deren Stelle statische Kondensatoren treten, die als Löschkondensatoren bezeichnet werden und welche durch passende Schaltung intermittierend durch die ankommende Gleichspannung aufgeladen und während der Ueberlappung der Anoden entladen werden. Wir treten auf diese Schaltung hier nicht näher ein und dürfen dies um so eher, als praktisch die Kommutierung fremderregter Wechselrichter mit Hilfe der Netzspannung weitaus grössere Bedeutung als diejenige mit Löschkondensatoren gewinnen wird. Man erkennt hieraus, dass das Löschen des Lichtbogens an den Anoden nicht durch unmittelbare Einwirkung des zugehörigen Steuergitters, sondern nur mittelbar infolge der Zündung der Nachbaranode und der zwischen beiden Anoden vorhandenen Spannung erfolgt. Anhand der bisher gemachten Voraussetzungen kann man ein derartiges Uebertragungssystem als eine elastische Kupplung zweier Drehstromnetze bezeichnen, wobei das eigentliche Kupplungssystem ein Gleichstromnetz darstellt, so dass die Frequenzen der beiden gekuppelten Drehstromnetze voneinander völlig unabhängig sind.

4. Verhalten im Betrieb.

Legt man sich jetzt die Frage vor: Was geschieht, wenn die vom sekundären Drehstromnetz aufgenommene Wirkleistung nicht symmetrisch dreiphasig, sondern unsymmetrisch in bezug auf die drei Phasen wird? Dann überlagert sich im Gleichstromsystem dem konstanten Gleichstrom eine Oberwelle, deren Grundfrequenz gleich der doppelten Netzfrequenz des Sekundärnetzes ist. Da indessen diese einphasige Unsymmetrie im allgemeinen sehr gering gehalten werden kann, so ist durchaus keine Gefahr vorhanden, dass diese Oberwelle im Gleichstromnetz irgendwie gefährliche Werte annehmen kann.

Wir haben uns sodann mit der weiteren Frage zu befassen, wie die vom sekundären Drehstromnetz geforderte Blindleistung sich verteilt, genauer gesagt: Kann durch das Gleichstromübertragungssystem auch Blindleistung vom Primärnetz in das Sekundärnetz abgegeben werden? Die Antwort darauf lautet theoretisch: Ja. Dazu ist immerhin die Einschränkung zu machen, dass nur einphasige Blindleistung, also die unsymmetrische Komponente der Blindleistung überhaupt durch die Gleichstromleitung fließen kann. Dieser vom Gleichstromnetz gelieferte Anteil der einphasigen Blindleistung wird voraussichtlich im allgemeinen infolge der hohen Reaktanz der Gleichstromleitung viel kleiner sein, als der von den am Sekundärnetz angeschlossenen Synchronmaschinen gelieferte Anteil. Die Uebertragung der einphasigen Blindleistung über die Gleichstromleitung erfolgt auch hier ähnlich wie wir dies bei der einphasigen Wirkleistung schon festgestellt haben, in Form einer dem Gleichstrom überlagerten Oberwelle mit doppelter Netzfrequenz. Die Richtigkeit dieser Feststellung lässt sich leicht anhand der Energiebilanz verfolgen. Denn ein einphasiger Blindstrom stellt energetisch ein Arbeitsquantum dar, welches zwischen zwei Apparaten mit doppelter Netzfrequenz hin und her pendelt. Wenn nun die Spannung, welche diese Leistung überträgt, wie im vorliegenden Falle eine Gleichspannung ist, so muss der Strom, der diese Blindleistung verkörpert, denselben zeitlichen Verlauf, also als Wechselstrom auch dieselbe Frequenz haben wie die Blindleistung. Diese der Unsymmetrie der Belastung des sekundären Drehstromnetzes entspringende, dem Gleichstrom überlagerte Wechselstromkomponente muss durch bestmögliche Wahrung der Belastungssymmetrie im sekundären Drehstromnetz in niedrigen Grenzen gehalten werden, weil diese Wechselstromkomponente in der Eisenarmatur des Uebertragungskabels zusätzliche Verluste hervorruft, welche in Rücksicht auf die Erwärmung des Kabels und auf den Energieverlust als solchen möglichst vermieden werden müssen. Die mehrphasig symmetrische Blindleistung hingegen bleibt ohne jede Rückwirkung auf das Gleichstromsystem, indem sie dauernd innerhalb der aufeinanderfolgenden Phasen des Drehstromsystems verläuft und keine Veranlassung hat, ins Gleichstromnetz überzutreten.

Wir fragen uns weiter: Wie verhält sich der statische Umformer hinsichtlich seines Leistungsfaktors oder, mit anderen Worten: Ist der bisher besprochene statische Umformer als Wechselrichter *Erzeuger* oder *Verbraucher* von nachteilender Blindleistung. Diese Frage ist in Anbetracht der in Rede stehenden absoluten Energiemengen von grosser Bedeutung. Als Erzeuger von nachteilendem Blindstrom entlastet, als Verbraucher aber belastet er das sekundäre Drehstromnetz mit Blindstrom. Aus der oben beschriebenen Wirkungsweise des Wechselrichters ergibt sich nun der Schluss, dass der Wechselrichter in das sekundäre Wechselstromnetz voreilenden Blindstrom abgibt oder, was dasselbe bedeutet, nachteilenden Blindstrom aus demselben aufnimmt, d. h. also: der Wechselrichter bedeutet für das sekundäre Wechselstromnetz nach dem heutigen Stande der Entwicklung eine zusätzliche Blindstrombelastung. Diese muss durch die angeschlossenen Synchronmaschinen aufgebracht werden, deren Summenleistung somit u. a. von der Grösse dieses Blindstromes in beträchtlichem Masse beeinflusst wird. Da somit diese Synchronmaschinen nicht nur die Blindleistung der eigentlichen Verbraucher, sondern nach dem eben Gesagten auch diejenige der Wechselrichter aufbringen müssen, so drängt sich unmittelbar der Wunsch auf, die Wechselrichter nicht als Verbraucher, sondern als Erzeuger von nachteilender Blindleistung einzusetzen oder aber zum mindesten den Wechselrichter neutral, d. h. auf $\cos \varphi = 1$ zu halten.

Während die Hochvakuum-Glühkathodenröhre ihrem Aufbau entsprechend die Erzeugung von nachteilender Blindleistung gewährleistet, ist diese Möglichkeit bei dem dampfgefüllten Steuerventil erst in letzter Zeit offenkundig geworden. Die oben besprochenen Steuergitter in Entladungsapparaten mit Gas- oder Dampfzuführung besitzen die kennzeichnende Eigenschaft, dass mit ihrer Wirkung die Zündung eines Lichtbogens nur zeitlich verzögert, der einmal brennende Lichtbogen aber nicht willkürlich gelöscht werden kann. Wir wollen diese Gitter mit dem Namen *Zündgitter* bezeichnen und stellen fest, dass Entladungsapparate mit Zündgitter das mit ihnen verbundene Wechselstromnetz unter allen Umständen mit nachteilendem Blindstrom belasten. Im Gegensatz zu diesem heute allgemein bekannten Zündgitter gestattet das an Hand der neuesten Forschungsergebnisse im physikalischen Laboratorium der A.-G. Brown Boveri in Baden entwickelte *Löschgitter* auch die willkürliche Löschung des brennenden Lichtbogens in beliebiger Spannungsphase auch im dampfgefüllten Lichtbogenraum⁹⁾. Diese Feststellung ist von sehr weittragender Bedeutung. Sie bedeutet nichts anderes, als dass damit die Möglichkeit geschaffen wird, derartige Ventile als Phasenkompensatoren zur *Erzeugung* nachteilenden Blindstromes heranzuziehen und auf diese Weise die angeschlossenen Synchronmaschinen vom nachteilenden Blindstrom mehr oder weniger zu entlasten. Wir werden somit in einer abseh-

⁹⁾ Kobel, Bull. SEV 1933, Nr. 3, S. 41.

baren Zukunft nicht mehr wie heute Gleichrichter und Wechselrichter als Verbraucher, sondern als Erzeuger von nachteiliger Blindleistung betrachten dürfen, wobei diese Apparate also die Rolle eines statischen Phasenkompensators übernehmen werden. Von dieser physikalischen Erkenntnis bis zur technisch brauchbaren Durchführung eines Gleichrichters oder Wechselrichters mit Ueberkompensation für die erforderliche Einheitsleistung wird indessen noch sehr viel Entwicklungsarbeit zu leisten sein.

Bis dahin muss nun wieder unsere Synchronmaschine als Phasenkompensator einspringen, welche wir bei der Erläuterung der Umformung als vorhanden vorausgesetzt haben. Nicht nur die gesamte vom sekundären Drehstromnetz aufgenommene, sondern auch die vom Wechselrichter selbst beanspruchte dreiphasige Blindleistung muss somit von den am sekundären Drehstromnetz laufenden Synchronmaschinen gedeckt werden, seien es nun Generatoren, Motoren oder eigentliche Synchronphasenschieber. Die Synchronmaschine übernimmt damit ausser der eingangs erwähnten Frequenzhaltung eine zweite, nicht weniger wichtige Funktion als Blindleistungserzeuger in dem gespeisten Drehstromnetz.

Bisher haben wir gezeigt, dass die statische Umformung eines Gleichstromes in Drehstrom heute prinzipiell möglich ist. Wir wollen kurz noch auf einen Sonderfall eintreten, der nicht so sehr von grosser wirtschaftlicher Bedeutung, als vielmehr vom Standpunkte der Anwendung des Steuerventils und als Vergleich mit den Verhältnissen bei der Drehstromübertragung interessant ist. Denken wir uns am Ende der Gleichstromübertragung ein Pumpspeicherkraftwerk. Nach den bisherigen Erläuterungen könnten wir nach Inbetriebnahme mindestens einer Synchronmaschine als Generator und Verbindung derselben mit dem Gleichstromnetz daraus elektrische Leistung aufnehmen. Wenn wir aber der Sache auf den Grund gehen, so ergibt sich die vorerst überraschende Tatsache, dass wir jede Synchronmaschine, sobald sie nur einmal in der besprochenen Weise auf eine gewisse Drehzahl gebracht und über das Steuerventil an das Gleichstromnetz angeschlossen ist, auch ohne weiteres als Motor mechanisch belastet werden kann. Wir haben also dann einen kommutatorlosen Gleichstrommotor vor uns, der über einen Transformator an einem Gleichstromnetz angeschlossen werden kann und konstruktiv vollkommen identisch ist mit einer normalen Synchronmaschine. Genau wie jeder Gleichstrom-Kommutatormotor kann ein derartiger kommutatorloser Gleichstrommotor jede beliebige Charakteristik erhalten, sei es Reihenchluss-, Nebenschluss- oder Compound-Charakteristik. Verglichen mit dem bekannten Gleichstrom-Kommutatormotor haben wir bei diesem kommutatorlosen Gleichstrommotor mit Ventilsteuerung die Arbeitswicklung statt auf den Rotor in den Stator und die Feldwicklung statt in den Stator nun in den Rotor verlegt und zugleich den Kommutator

und die Bürste durch das Steuerventil ersetzt. Auf unser Beispiel des Speicherkraftwerkes angewendet, hat diese Erkenntnis folgende Bedeutung: Kann ein Speicherkraftwerk aus irgendwelchen Gründen nicht durch Drehstromleitungen mit anderen Kraftwerken verbunden werden, so können zum Antrieb der Speicherpumpen die Synchronmotoren ihre Leistung unmittelbar über die zugehörigen Transformatoren dem Gleichstromnetz entnehmen. Die Geschwindigkeitsregulierung derartiger Motoren kann erstens mit Hilfe der Gittersteuerung, zweitens durch Regulierung des Erregerstromes im Polrad und drittens durch Stufenschalter am Transformator erfolgen. Der Transformator zwischen dem Motor und dem Gleichstromnetz ist auf die Wirkungsweise des Motors ohne jeden Einfluss, aus dem einfachen Grunde, 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 Steuerventil gelegt wird. Eine Synchronmaschine arbeitet auf diese Weise genau wie ein Gleichstrommotor.

Endlich wollen wir uns noch über die Schalterfrage Rechenschaft ablegen. Soweit es sich nur darum handelt, einzelne Umformerwerke oder einzelne Umformergruppen willkürlich zu- oder abzuschalten, wird dies mit Hilfe der Gittersteuerung und der Oelschalter auf der Drehstromseite erfolgen. Alle diese Hilfsmittel versagen aber, wenn aus irgendeinem Grunde die Wechselspannung zusammenbricht, also bei einem Kurzschluss im sekundären Drehstromnetz. Dann fliesst sofort durch den Wechselrichter ein Ueberstrom. Wenn dieser Ueberstrom einen gewissen Wert überschreitet, so entsteht, wie wir vorhin erkannt haben, im Wechselrichter selbst ein zweiter Kurzschluss, welcher allen Massnahmen auf der Wechselstromseite, d. h. im sekundären Wechselstromnetz trotzt und die Notwendigkeit ergibt, dass der Wechselrichter unbedingt und so rasch als möglich vom Gleichstromnetz abgetrennt werden muss. Diese Notwendigkeit besteht auch dann noch, wenn der ursprüngliche Kurzschluss auf der Drehstromseite durch die Oelschalter des betreffenden Netzteiles abgeschaltet worden ist. Theoretisch bestünde wohl die Möglichkeit, derartige Kurzschlüsse durch Anwendung der Gittersteuerung im Gleichrichter am Anfang der Uebertragungsleitung zu unterbrechen. Praktisch ist dieser Weg indessen nicht gangbar, und zwar aus folgenden Gründen: Eine derartige Abschaltung durch den speisenden Gleichrichter am Anfang der Leitung würde bedeuten, dass bei jedem schweren Kurzschluss im sekundären Drehstromnetz auch das Gleichstromsystem spannungslos gemacht werden müsste. Unter der Bedingung, dass diese Spannungsenkung nur während wenigen Perioden andauern würde, wäre dies schliesslich, wenn nicht gerade erwünscht, so doch voraussichtlich noch erträglich. Nun aber wurde in der Einleitung hervorgehoben, dass die Gleichstromübertragung überhaupt nur bei sehr grossen Uebertragungsdistanzen gerecht-

fertigt ist. Somit müsste man zwecks Abschaltung eines Kurzschlusses mit Hilfe der speisenden Gleichrichter ein Kabel von mehreren hundert Kilometer Länge vollständig entladen und unmittelbar nachher wieder auf volle Spannung aufladen. Dass dies nicht innerhalb einiger hundertstel Sekunden möglich ist, liegt auf der Hand. Umgekehrt steht uns eine genügende Zeitspanne zur Entladung und nachfolgenden Wiederaufladung des Kabels auf die Betriebsspannung mit Rücksicht auf das Zusammenbrechen des sekundären Wechselstromnetzes gar nicht zur Verfügung. Wir kommen unweigerlich zu dem Resultat, dass wir einen Gleichstromschalter benötigen, welcher in diesem Fall den Umformer so rasch als möglich vom Gleichstromnetz abtrennt.

Ein solcher Gleichstromschalter für Spannungen von mehr als 200 kV besteht heute noch nicht. Wir wollen aber zeigen, dass es anhand der heute vorliegenden Kenntnisse nicht ausgeschlossen ist, auch dieses Problem zu lösen. Man denke sich einen Lichtbogen zwischen einer Anode und einer Quecksilberkathode. Es ist bekannt, dass ein Quecksilberdampflichtbogen völlig willkürlich dadurch gelöscht werden kann, indem man ihn durch einen Kondensator überbrückt. Dieses Parallelschalten eines spannungslosen Kondensators bedeutet für den Lichtbogen einen kurzzeitigen vollkommenen Kurzschluss, wobei der Kondensator den gesamten Lichtbogenstrom momentan an sich reisst. Indem er also dadurch sowohl die Anode als auch die Kathode während einer ganz kurzen Zeit stromlos macht, erlöscht indessen sowohl der Lichtbogen an den Anoden als auch der Kathodenfleck auf der Kathode. Zu diesem Erlöschen genügt eine Unterbrechung des Stromes während geringen Bruchteilen einer Tausendstel Sekunde. Wenn man das Steuergitter während dieses Stromunterbruchs negativ aufgeladen hält, dann muss zur neuen Zündung des Lichtbogens eine sehr grosse Spannung aufgewendet werden. Genügt die vorhandene Spannung nicht zur Zündung, dann lädt sich nun einfach der Kondensator auf die Betriebsspannung auf und nachdem dies geschehen, hört der Stromfluss in der Zuleitung vollkommen auf, d. h. die Leitung ist unterbrochen. Die Einschaltung des Kondensators bei Ueberstrom erfolgt dabei, um die Abschaltung so rasch als nur möglich einzuleiten, zweckmässig nicht mit Hilfe von mechanischen Vorrichtungen, sondern mit besonderem Vorteil mit Hilfe einer Funkenstrecke, welche in Abhängigkeit vom Betriebsstrom durch eine Zusatzspannung gezündet wird. In Fig. 4 ist das Prinzipschema eines derartigen Hochspannungsschalters dargestellt. Bei einem rasch ansteigenden Ueberstrom im Gleichstromsystem wird in der Sekundärwicklung des Zündtransformators T ein Spannungsschoss induziert, welcher die Funkenstrecke zum Ansprechen bringt. Der zwischen den Elektroden E_1 und E_2 entstandene Lichtbogen wird magnetisch auf die Elektrode E_3 geblasen, wodurch der vorgeladene Kondensator C zwischen die Anode und die Kathode des Schalt-

ventils geschaltet wird und dieses augenblicklich stromlos macht. Dadurch löscht der Lichtbogen im Schaltventil, während die Wiedierzündung durch das negativ geladene Steuergitter G erschwert wird.

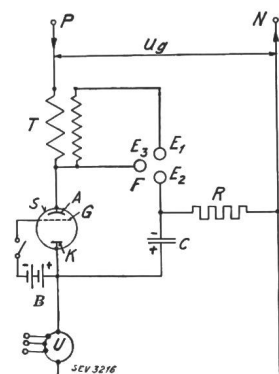


Fig. 4.

- | | |
|----|---------------------------------|
| PN | Gleichstrom-Netz. |
| S | Quecksilberdampf-Schalter. |
| G | Steuergitter. |
| A | Anode. |
| K | Kathode. |
| B | Steuerbatterie. |
| T | Zündtransformator. |
| F | Funkenstrecke. |
| C | Löschkondensator. |
| R | Ladewiderstand. |
| U | Gleichstrom-Drehstrom-Umformer. |

Der dargestellte Zündtransformator dient nicht nur zum Zünden der Funkenstrecke, sondern gleichzeitig auch als Glättungsdrosselspule und erleichtert in dieser Eigenschaft den Uebergang des Lichtbogens von einer Anode auf die nächstfolgende. Endlich wird durch diese Drosselspule auch der Ladestrom, welcher von der Gleichstrom(Kabel-)leitung infolge der pulsierenden Gleichspannung aufgenommen wird, sowie auch der der sekundären Belastungsunsymmetrie entsprechende Strom mit doppelter Sekundärfrequenz vermindert und damit auch die damit verbundene Beanspruchung des Dielektrikums der Hochspannungskabel, was für die Bemessung derselben von sehr grosser Bedeutung ist. Der Zündtransformator erfüllt somit gleichzeitig drei sehr wichtige Funktionen. Man hat schon heute mit einer derartigen Einrichtung direkte Gleichstromkurzschlüsse bei einer Gleichspannung von 1500 V zuverlässig innerhalb 1,5 bis 2 Tausendstel Sekunden abgeschaltet, in einer Zeit also, die nur ein Zehntel derjenigen eines modernen Schnellschalters beträgt. Bis zu welchen Spannungen dieses Prinzip sich noch anwenden lässt, entzieht sich unserer Kenntnis. Indessen ist zu erwarten, dass durch Reihenschaltung mehrerer derartiger Quecksilberdampfschalter auch Gleichspannungen von der Grössenordnung 200 kV, wie sie für die Gleichstromkraftübertragung erforderlich sind, bewältigt werden können. In diesem Zusammenhang muss auch die Möglichkeit der Verwendung der oben genannten «Löschgitter» in derartigen Hochspannungsgleichstromschaltern ganz besonders erwähnt werden.

Ueber die Einheitsleistung derartiger statischer Umformer lässt sich sagen, dass nach heutiger Auffassung eine Leistung von 50 bis 100 MW pro Einheit erstrebt werden muss. Während Dreiphasentransformatoren schon heute für diese Leistungen herstellbar sind, steckt die Entwicklung der Steuer-ventile in der Richtung grosser Leistungen erst in den allerersten Anfängen. Wir stehen ja heute am Anfang einer neuen Epoche in der Elektrotechnik, die gekennzeichnet ist durch die Verwendung des

Ventils in der Gleichstromtechnik. Wenn wir heute auch die Anwendungsmöglichkeiten dieser Ventile zu erkennen beginnen, so wird ihre Entwicklung in der Richtung grosser Spannungen und grosser Einheitsleistungen noch eine Riesenarbeit erfordern.

5. Zusammenfassung.

Zusammenfassend ergibt sich heute folgendes Bild von der zukünftigen Gleichstromübertragung: Die Gleichstromkraftübertragung ist nur da wirtschaftlich, wo die Einsparung in den Kosten für die Uebertragungsleitungen mit Einschluss der kapitalisierten Uebertragungsverluste wesentlich grösser ist als der Mehraufwand für die Umformer selbst wird. Sie kann infolgedessen nur für sehr grosse Uebertragungsdistanzen von mehreren Hundert Kilometern und nur unter Voraussetzung einer gewissen Konzentration in der Energiezufuhr und Energieabgabe, d. h. unter Voraussetzung grosser Einheitsleistungen, Vorteile bieten. Die Gleich-

stromkraftübertragung muss voraussichtlich auf der Grundlage konstanter Spannung und variablen Stromes aufgebaut werden. Die Uebertragungsleitung selbst wird mit grossem Vorteil als Kabel in die Erde verlegt. Die Gleichstromkraftübertragung unterscheidet sich unter diesen Voraussetzungen von der Drehstromkraftübertragung im wesentlichen nur durch das Dazwischentreten des Gleichrichters und des Wechselrichters und gestattet gleich wie die Drehstromübertragung die Entnahme sowohl von Drehstrom als auch von mechanischer Leistung unmittelbar aus dem Gleichstromnetz. Die Regulierung der übertragenen Leistungsanteile erfolgt genau wie bei Gleichstromanlagen durch Regulierung der Spannung der einzelnen Gruppen mit Hilfe der Steuergitter oder von Stufenschaltern an den Transformatoren. Der Ausbau der erforderlichen Apparatur nach den heute erkennbaren Richtlinien hinsichtlich Beherrschung der grossen Spannungen, Leistungen und der Ueberströme wird noch gewaltige Anstrengungen erfordern.

Terrestrische Bestimmung von Freileitungsmesswerten mit Spezial-Theodolit.

Von W. Schnittger, Berlin.

621.315.056.1

Nach kritischer Erwähnung verschiedener bekannt gewordener Methoden zur Bestimmung von Freileitungsdurchhängen wird das allgemein brauchbare Verfahren von Küppers, Besser und Böhm beschrieben, bei dem ein Spezial-Theodolit zur Verwendung kommt. Durch Messbeispiele wird die praktische Anwendung erläutert.

Après un exposé critique des différentes méthodes connues pour la détermination de la flèche des lignes aériennes, l'auteur décrit le procédé de Küppers, Besser et Böhm utilisant un théodolite spécial, puis en montre l'application pratique à l'aide de quelques exemples.

1. Einleitung.

Bei der Bauausführung von Freileitungen grosser Spannweiten — elektrische Fernleitungen oder Seilbahnen — ist die Ermittlung bestimmter Messgrössen erforderlich. Bauaufsicht und Abnahmebehörde sind ganz besonders an der exakten Bestimmung des Leitungsdurchhangs interessiert, da ein Untermass bei ungünstigen meteorologischen Verhältnissen zum Zerreißen der Leitungen führen kann und ein Uebermass aus Kostengründen unerwünscht ist. Im nachfolgenden ist daher die für den Ingenieur geeignete terrestrische Messmethode zur Ermittlung der genannten Werte, bei der trigonometrische Höhenmessungen mit Spezial-Theodolit erfolgen, ausführlich besprochen und andere Verfahren ihrer geringeren Bedeutung wegen nur kurz behandelt.

Liegen beide Aufhängepunkte in gleicher Höhe über dem horizontalen Erdboden (Fig. 1), so ist der grösste Durchhang als Differenz der Masthöhe und des tiefsten Leitungspunktes gegeben, wogegen bei nicht horizontaler Aufhängung (Fig. 2) als Mass des Durchhanges der lotrechte Abstand zwischen der Verbindungslinie der Aufhängepunkte und der parallel zu dieser an die Seilkurve gelegten Tangente gilt.

Jede frei aufgehängte Leitung folgt der Gleich-

chung der Kettenlinie¹⁾; nach dieser liegt der grösste Durchhangswert im ersten Fall in der Mitte

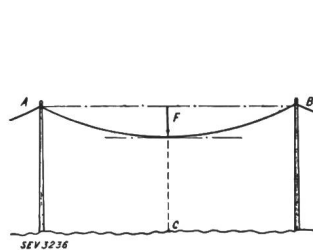


Fig. 1.

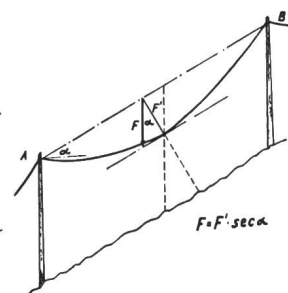


Fig. 2.

und im zweiten dem oberen Aufhängepunkt genähert. Das Mass der Näherung und der Durchhang selbst sind bei überhöhter Aufhängung nur durch besondere Methoden festzustellen.

2. Messverfahren für die Ermittlung des Leitungsdurchhanges.

a) Bei horizontaler Aufhängung, stromloser Leitung und zugängigem Fusspunkt C kann man den Durchhang mit Messlatte in direkter Messung be-

¹⁾ v. Schober: Die Anwendung der Bildmessung für die Bestimmung von Seilkurven bei Seilfähren und Seilbahnen. Bildmessung und Luftbildwesen 1932, Nr. 3.