

Zeitschrift: Bulletin de l'Association suisse des électriciens
Herausgeber: Association suisse des électriciens
Band: 33 (1942)
Heft: 6

Artikel: Probleme der Gleichstrom-Energieübertragung bei sehr grossen Leistungen und Distanzen und der wirtschaftliche Vergleich zwischen der Fernübertragung mit Drehstrom und Gleichstrom
Autor: Ehrensperger, C.
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-1056652>

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: 25.12.2024

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

REDAKTION:
Sekretariat des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins
Zürich 8, Seefeldstrasse 301

ADMINISTRATION:
Zürich, Stauffacherquai 36 ♦ Telefon 5 17 42
Postcheck-Konto VIII 8481

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

XXXIII. Jahrgang

N° 6

Mittwoch, 25. März 1942

Bericht über die Diskussionsversammlung des SEV

vom 13. Dezember 1941 in Zürich

über

Höchstleistungsübertragung auf grosse Distanzen

(Fortsetzung von Seite 131.)

Probleme der Gleichstrom-Energieübertragung bei sehr grossen Leistungen und Distanzen und der wirtschaftliche Vergleich zwischen der Fernübertragung mit Drehstrom und Gleichstrom

Vortrag, gehalten an der Diskussionsversammlung des SEV vom 13. Dezember 1941 in Zürich,
von Ch. Ehrensperger, Baden.

621.315.051.024

Même si la production et la distribution de l'énergie sont encore à l'avenir les plus avantageuses par courant triphasé, le développement actuel de la technique permet déjà d'exécuter les transmissions de grandes puissances à grandes distances par courant continu. Des recherches théoriques ont montré que, pour la transmission par courant continu, le système à tension constante avec point médian directement à la terre convient spécialement.

En ce qui concerne les équipements convertisseurs, les mutateurs à vapeur de mercure sont comparés avec les machines rotatives; il en découle que les mutateurs sont supérieurs, au point de vue économique, aux machines convertisseuses. Quelques exemples de schémas de groupes de mutateurs à haute tension pour grande puissance sont expliqués. L'auteur mentionne, en outre, brièvement l'influence de la courbe non sinusoïdale des courants alternatifs des mutateurs sur les machines synchrones raccordées au réseau ainsi que

les répercussions du transport d'énergie sur les lignes à courant faible.

Pour les études sur la rentabilité des transmissions à grande puissance par courant continu, on a déterminé les bases de comparaison économique entre les transmissions par courant continu et par courant triphasé; le résultat est donné graphiquement en fonction de la puissance et de la distance pour deux cas extrêmes. La façon de faire le calcul économique est indiquée dans le même tableau pour les courants alternatif et continu. Les résultats des recherches sur la détermination de la tension la plus économique de transmission sont donnés dans des graphiques. Il ressort de cette étude que la transmission par courant continu est plus économique que la transmission par courant triphasé pour les distances supérieures à 200...300 km pratiquement, quelle que soit la puissance.

Aus dem Vortrag von Herrn Dr. Wanger geht hervor, dass es heute möglich ist, beliebig grosse Leistungen auf beliebige Entfernungen mit Drehstrom stabil zu übertragen. Man kann sich daher fragen, ob es überhaupt einen Sinn hat, die Energieübertragung mit Gleichstrom ernstlich zu erwägen. In der Tat lautet die Frage nicht: Drehstrom oder Gleichstrom, sondern: wie kann man grosse Energiemengen auf weite Entfernungen mit möglichst geringen Kosten übertragen, und erst in zweiter Linie fragt man, was billiger ist, der Drehstrom oder der Gleichstrom.

Bevor die Frage der Wirtschaftlichkeit erörtert werden kann, muss auch für Gleichstrom die technische Seite untersucht werden.

Von einem grossen Erzeugerzentrum sei Energie in ein fernliegendes Verbraucherzentrum zu übertragen (Fig. 1). Die Vorteile der Drehstromerzeu-

gung und Verteilung sind bekannt. Sie sind so gross, dass man heute auf sie gar nicht mehr verzichten kann. Es soll daher sowohl die Erzeugung als auch

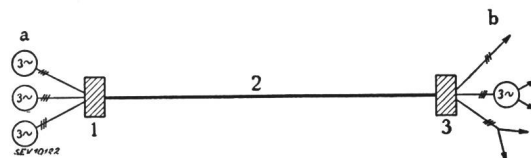


Fig. 1.

Energie-Übertragung von einem Erzeugerzentrum in ein Verbraucherzentrum mit Hilfe der Gleichstrom-Übertragung
a Drehstrom-Erzeugung. b Drehstrom-Verteilung.

Die Elemente der eigentlichen Übertragungsanlage sind:
1 Sendestation. 2 Übertragungsleitung. 3 Empfangsstation.

die Verteilung weiterhin mit Drehstrom konstanter Spannung vorgenommen werden. Nur die Übertragung selbst soll mit Gleichstrom erfolgen. In der Sendestation wird der Drehstrom in Gleich-

strom umgeformt und in der Empfangsstation erfolgt die Rückformung des Gleichstromes in Drehstrom. Die eigentliche Uebertragungsanlage besteht somit aus drei Elementen, der Sendestation, der Uebertragungsleitung und der Empfangsstation. Im Vortrag von Herrn Vögeli wird die Uebertragungsleitung behandelt. Die folgenden Ausführungen dagegen beziehen sich vor allem auf die beiden Endstationen. Bevor jedoch mehr auf die Einzelheiten eingegangen werden kann, sollen noch einige grundsätzliche Fragen allgemeiner Art erörtert werden.

1. Die Systemfrage

Dazu gehört vor allem die Frage, ob die Uebertragung mit konstanter Stromstärke oder mit konstanter Spannung vorgenommen werden soll. Fig. 2 zeigt eine Zusammenstellung von Systemen kon-

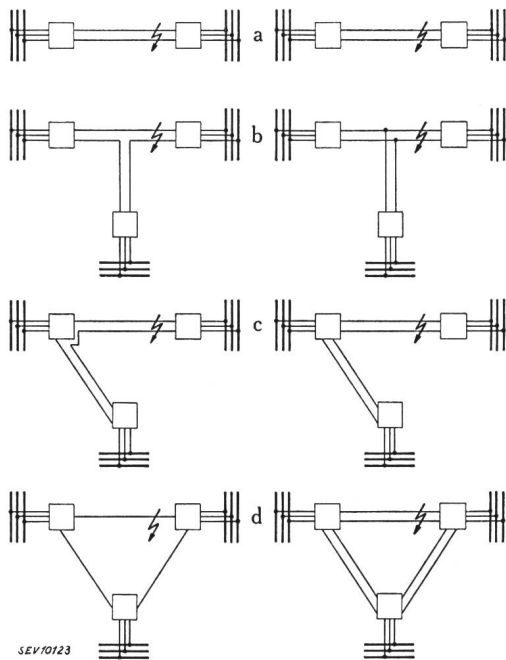


Fig. 2.

Vergleich von Uebertragungsanlagen mit Konstantstrom- und Konstantspannungs-System

Links: Konstantstrom-Systeme (Serie-Systeme).

Rechts: Konstantspannungs-Systeme (Parallel-Systeme).

- a Einfache Uebertragungsleitung.
- b Uebertragungsleitung mit Stichleitung.
- c Einfache Verbindung dreier Endstationen.
- d Vermaschtes Netz.

Störungen, z. B. Kurzschluss oder Leitungsunterbruch werden beim Konstantstrom-System durch Ueberbrückung und beim Konstantspannungs-System durch Abschaltung des kranken Netztes beseitigt.

stanter Stromstärke und Systemen konstanter Spannung für verschiedene Fälle a, b, c und d. Die Quadrate bedeuten Umformungsanlagen, in denen Wechselstrom in Gleichstrom und umgekehrt umgeformt wird. Beim Konstantstrom-System enthalten diese Umformungsanlagen ausserdem Einrichtungen, um Konstantspannungs-Systeme in Konstantstrom-Systeme und umgekehrt umzuformen. Entsprechend der Aufgabestellung denkt man heute erst daran, eine einfache Uebertragungsleitung nach a zu bauen, bei welcher der Unterschied zwischen Serie- und Parallel-System überhaupt nicht in Erscheinung tritt. Es ist aber mit Rücksicht auf eine

eventuell spätere Vermaschung von Höchstspannungs-Gleichstromnetzen nötig, heute schon den Fall vermaschter Netze in Betracht zu ziehen. Die Fälle a, b, c sind in beiden Systemen gleichwertig. Dagegen besteht im Falle d bei mehrfacher Vermaschung ein Unterschied. Um diesen besser zu erkennen, sei für die verschiedenen Fälle eine Störung, z. B. Kurzschluss oder Leiterunterbruch, angenommen. Solche Störungen werden beim Konstantstrom-System durch Ueberbrücken und beim Konstantspannungs-System durch Abschalten des kranken Netztes beseitigt. Beim Falle d verursacht eine Störung im Konstantstrom-System einen Unterbruch des Energie-Austausches zwischen allen drei Stationen, wogegen beim Konstantspannungs-System der Betrieb über die beiden gesunden Leitungen weitergeführt werden kann. Der Vergleich ist aber nicht vollständig, denn beim Konstantstrom-System braucht man im Fall d weniger Leiter. Um beide Systeme auf gleiche Basis zu stellen, wäre es nötig, im Falle d links eine Verdoppelung der Anlage vorzunehmen, oder eine Reserveleitung mit zugehörigen Umschalteneinrichtungen vorzusehen. Man erkennt daraus, dass bei mehrfacher Vermaschung das Konstantstrom-System auf alle Fälle umständlicher ist, als das Konstantspannungs-System.

Im Falle von Ueberlast ergeben sich beim Konstantspannungs-System nur erhöhte Verluste. Beim Konstantstrom-System dagegen steigt die Spannung und es wird nötig, die Isolation und das Eisen der Transformatoren für die höchste bei Ueberlast vorkommende Spannung zu bemessen.

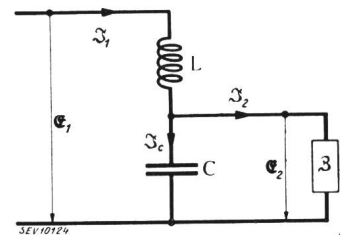


Fig. 3.

Strom-Spannungs-Gesetz von Boucherot

(1) $E_1 = [I_2 + I_C] j \omega L + E_2$

(2) $I_C = E_2 j \omega C$

(3) $E_1 = I_2 j \omega L + E_2 (1 - \omega^2 LC)$

Wenn C und L in Resonanz ($\omega^2 LC = 1$), folgt:

(4) $E_1 = I_2 j \omega L$

$I_2 = 0 \rightarrow E_2 = 0 \rightarrow E_1 = I_1 j \omega L$

$I_2 = \infty \rightarrow I_1 = 0 \rightarrow E_1 = 0$

E_1 Konstante Spannung, I_2 Konstanter Strom.

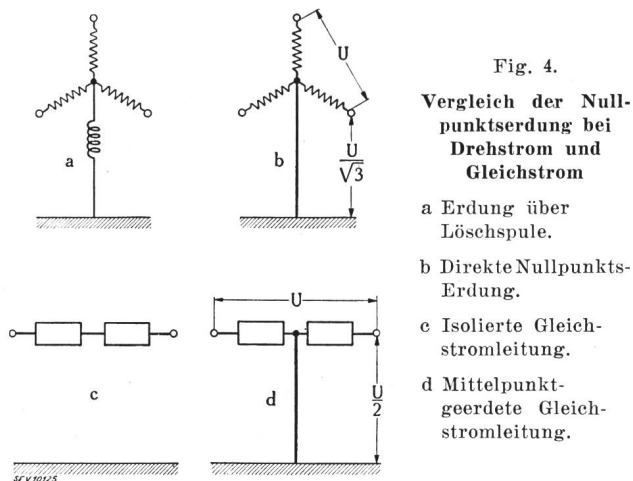
Bei Kurzschluss ($I_2 = 0$) bleibt der Strom I_1 durch die Induktivität L begrenzt.

Dem Leitungsunterbruch ($I_2 = \infty$) auf der Konstantstrom-Seite entspricht ein Kurzschluss ($E_2 = 0$) auf der Konstantspannungs-Seite.

Anhand von Fig. 3 sieht man, wie mit Hilfe des Strom-Spannungs-Gesetzes von Boucherot ein Konstantspannungs-System in ein Konstantstrom-System umgewandelt werden kann. Aus den angegebenen Gleichungen geht die Wirkung der Schaltung hervor. Dabei beachte man, dass sowohl Induktivität als auch Kapazität für den vollen Strom und die volle Spannung der übertragenen Leistung zu bemessen sind. Es ist daher ein weiterer Vorteil des Konstantspannungs-Systems, dass bei diesem solche Stromkreise überhaupt nicht nötig sind.

Es sprechen somit drei Gesichtspunkte, nämlich 1. Komplikation bei vermaschten Netzen, 2. Bemessen der Isolation für Ueberlast und 3. Notwendigkeit der Anwendung von Boucherot-Stromkreisen, gegen das Konstantstrom-System und zugunsten des Systems konstanter Spannung.

Ein weiterer Punkt, der ebenfalls zur Systemfrage gehört, ist die *Isolierung der Leitung gegen Erde*. Fig. 4 zeigt die Erdung des Nullpunktes eines



Dreiphasen-Systemen über Löschspule und direkte Erdung. Darunter sind analog das isolierte Gleichstrom-System und das Gleichstrom-System mit geerdetem Mittelpunkt gezeichnet. Wie aus dem Vortrag von Dr. Wanger hervorgeht, ist bei Drehstrom die Frage «direkte Erdung oder Erdung über Löschspule» noch offen. Die dabei angeführten isolationstechnischen Ueberlegungen gelten sinngemäss auch für Gleichstrom. Ebenso bleibt die Analogie bei Erdschluss zwischen übereinandergezeichneten Systemen erhalten. Für Gleichstrom kommt aber noch ein neues Argument hinzu, und zwar: Wird einer der beiden Leiter, z. B. infolge Leiterbruch, defekt, so kann mit dem andern Leiter, mit vorübergehender Rückleitung durch die Erde, mindestens mit der halben Leistung der Betrieb aufrechterhalten werden. Bei Drehstrom wird es bei Bruch eines Leiters dagegen nötig, die ganze Leitung ausser Betrieb zu nehmen.

Dieser zusätzliche Vorteil entscheidet beim Gleichstrom-System für die Lösung mit geerdetem Mittelpunkt.

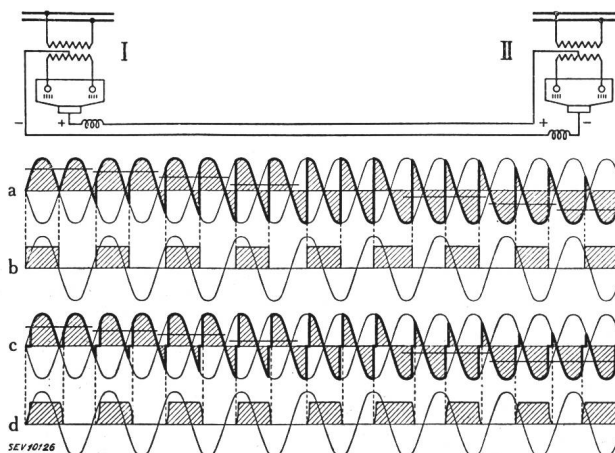
Es sei an dieser Stelle darauf hingewiesen, dass Gleichstrom-Energie mit der denkbar einfachsten Leitung übertragen werden kann, nämlich mit der eindrähtigen Leitung und Rückleitung durch die Erde. Schon Thury hat solche Leitungen gebaut und mit Erfolg betrieben¹⁾. Dies ist wohl die billigste Leitungsart, und schon diese Tatsache wird genügen, um diesem System die gebührende Anwendung in der Zukunft zukommen zu lassen.

¹⁾ Bulletin SEV 1930, Nr. 5, S. 157.

2. Die Umformung von Wechselstrom in Gleichstrom und die Rückumformung von Gleichstrom in Wechselstrom

Nach den grundsätzlichen Betrachtungen über das System und die Leitung ist es nun nötig, etwas näher auf die beiden Endstationen der Uebertragungsanlage einzugehen. Welche Umformungs-Systeme kommen da in Betracht? Thury verwendete rotierende Maschinen. Heute stehen Entladungsapparate für die Umformung zur Verfügung. Es kommen in Betracht, 1. Entladungsapparate, die mit Ueberdruck arbeiten (z. B. nach Prof. Marx), 2. solche, die mit Hochvakuum arbeiten, wie z. B. Rundfunksenderöhren, oder 3. Quecksilberdampf-Mutatoren. Im folgenden soll die Lösung mit Quecksilberdampf-Mutatoren etwas eingehender behandelt werden, weil diese bereits soweit entwickelt sind, dass ihre Anwendung für Gleichstrom-Uebertragung bevorsteht. Zum Vergleich wird dann noch die Lösung mit rotierenden Maschinen kurz gestreift.

Zum Verständnis der Wirkungsweise und des Aufbaues einer Endstation mit Mutatoren ist es nötig, ganz unten zu beginnen und sich nochmals das Prinzip des Wechselstrom-Gleichstrom- und des Gleichstrom-Wechselstrom-Mutators vor Augen zu halten. Fig. 5 zeigt eine vereinfachte Gleichstrom-



Wegen der grössern Phasenverschiebung zwischen Strom und Spannung beim Gleichstrom-Wechselstrom-Mutator ($\cos \varphi = \text{ca. } 0,8$) gegenüber dem Wechselstrom-Gleichstrom-Mutator ($\cos \varphi = \text{ca. } 0,9$), sind beim Gleichstrom-Wechselstrom-Mutator, d. h. auf der Empfangsseite, zusätzliche Blindstrom-Kompensations-Einrichtungen erforderlich.

Uebertragung mit einphasigen Mutatoren in Gegen-takt-Schaltung an beiden Enden. Aus den Kurven a und b erkennt man die Wirkungsweise des Wechselstrom-Gleichstrom- und des Gleichstrom-Wechselstrom-Mutators. Mit Rücksicht auf den später noch verwendeten Begriff der Ueberlappung

sei dieser anhand der Kurven c und d nochmals in Erinnerung gebracht. Man erkennt auch aus diesen Kurven, dass der Wechselstrom-Gleichstrom-Mutator mit verhältnismässig gutem $\cos \varphi$ ($= \text{ca. } 0,9$), dagegen der Gleichstrom-Wechselstrom-Mutator mit schlechterem $\cos \varphi$ ($= \text{ca. } 0,8$) arbeitet. Aus diesem Grunde ist es nötig, bei der Empfängerstation zusätzliche Blindstromkompensatoren (Synchronmaschinen oder statische Kondensatoren) aufzustellen.

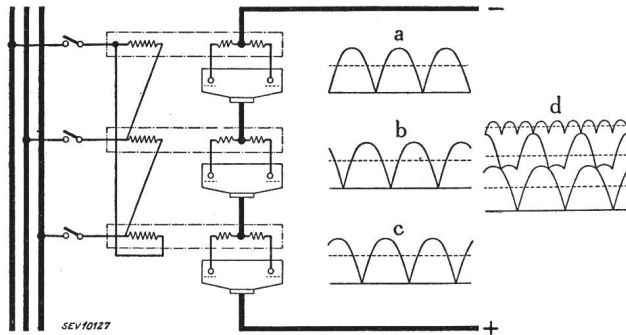


Fig. 6.

Kleine, sechsphasige Mutatoreinheit

aufgebaut aus 3 Einphasen-Einheiten in Gegentakt-Schaltung.
a, b, c Erzeugte Gleichspannungen der drei Mutatoren.
d Die durch Reihenschaltung sich ergebende Gleichspannung.

Nach diesen grundsätzlichen Betrachtungen interessiert der Aufbau von Einheiten, die in den Endstationen einer Gleichstromübertragungsleitung aufgestellt werden sollen. Je nach der Grösse der zu übertragenden Leistung werden grössere oder kleinere Einheiten benötigt. Fig. 6 zeigt eine kleine Einheit, die aus der Reihenschaltung von drei einphasigen Mutatoren in Gegentaktschaltung hervorgeht. Es ist vorgesehen, mit einer solchen Einheit 100 000 V, 500 A, d. h. 50 MW umzuformen. Je eine Phase des Drehstromnetzes speist einen der

drei Mutatoren. Ihre erzeugte Gleichspannung ist aus den Kurven a, b und c zu ersehen. Durch die Reihenschaltung (Kurve d) ergibt sich eine sechsphasige Welligkeit des Gleichstromes. Ebenso ist die Rückwirkung auf das Drehstromnetz sechsphasig. Bevor dazu übergegangen werden soll, grössere Einheiten zu behandeln, ist es nötig, kurz auf das Element einer Einheit, den Mutator selbst, etwas näher einzugehen.

Fig. 7 zeigt den Hochspannungsprüfstand, auf welchem Mutatoren für Uebertragungszwecke entwickelt worden sind.

Aus der über zehnjährigen Entwicklungszeit von Hochspannungs-Mutatoren sind in Fig. 8 zwei besondere Typen hervorgehoben. Links ist der Mutator der Landesausstellung zu sehen, der für die erste Uebertragung von Wettingen nach Zürich mit 50 kV, 500 kW und zeitweise mit 1000 kW im Betrieb stand. Rechts steht ein neuer Mutator, der für grosse Leistungen gebaut worden ist. Dieser Mutator wurde im Prüffeld bei etwas über 30 000 V mit einer mit Rücksicht auf die Grösse der Anlage begrenzten Stromstärke von 150 A in Gegentaktschaltung zweianodig belastet. Es besteht kein Grund, anzunehmen, dass mit diesem Mutator nicht noch höhere Stromstärken bewältigt werden können. Ausserdem besteht die Möglichkeit der Parallelschaltung der Anoden, um die Leistung dieses Typs noch weiter zu steigern.

Die aus dem Schema Fig. 6 hervorgehende Betriebsweise des Mutators in Gegentaktschaltung hat gegenüber dem sechsphasigen Betrieb noch den Vorteil der bessern Ausnutzung des Mutators selbst (Fig. 9). Die Gegentaktschaltung ergibt bei gleicher Sperrspannung eine kleinere Gleichspannung, aber dafür eine dreifache Anodenbrenndauer. Dies macht bei gleicher Anodenzahl eine Verdoppelung der Leistung gegenüber dem sechsphasigen Betrieb.

Für das angegebene System mit geerdetem Spannungsmittelpunkt ist in Fig. 10 die Kombination zweier kleiner Einheiten dargestellt. Diese Gruppe ist für 2×100 kV, 500 A und 100 MW bestimmt. Die obere Gruppe ist primär in Dreieck und die untere primär in Stern geschaltet. Man erhält dadurch eine gegenseitige Verschiebung der beiden Sechsenphasengruppen und damit eine zwölfphasige Rückwirkung auf das Drehstromnetz. Die Primärseite der untern Gruppe erhält zudem eine ter-

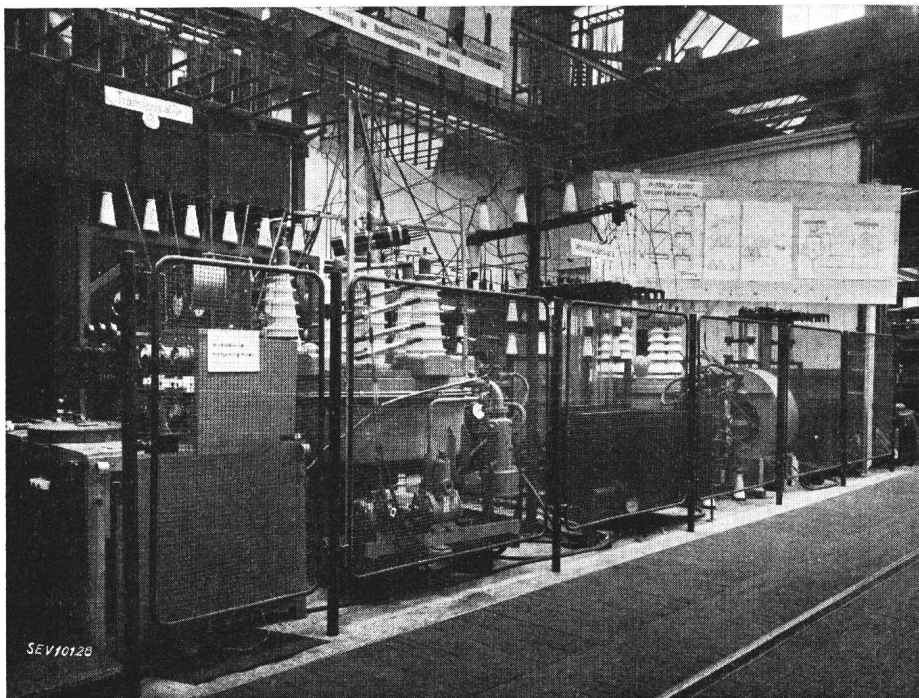


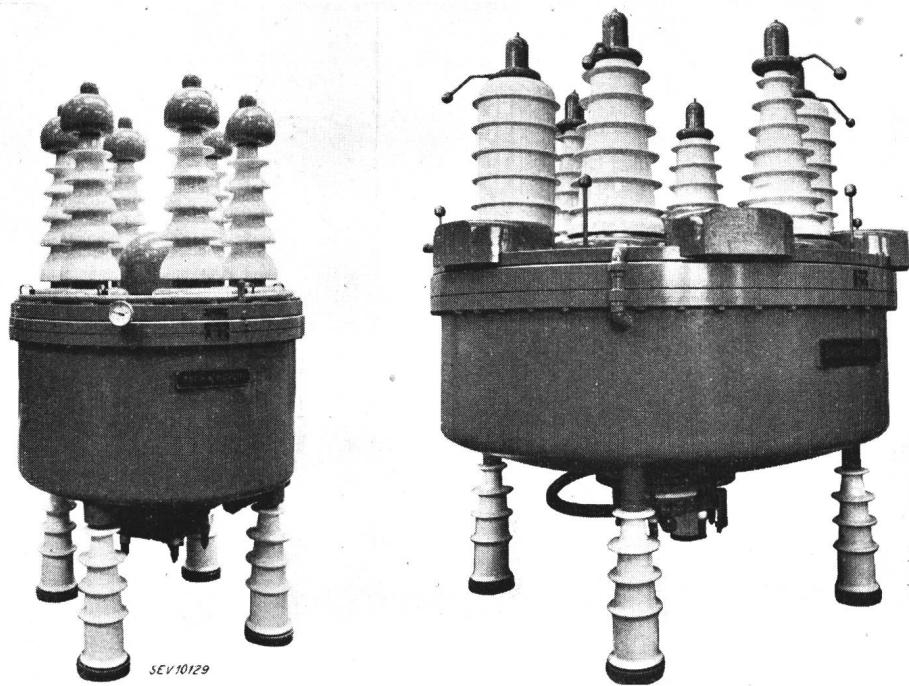
Fig. 7.

Hochspannungs-Prüfstand zur Entwicklung von Mutatoren für die Gleichstrom-Uebertragung

Fig. 8.

Hochspannungs-Mutatoren für Gleichstrom-Uebertragung

Links:
Mutator für die erste Uebertragungsanlage von Wettingen nach Zürich, anlässlich der Schweiz. Landesausstellung 1939.
Rechts:
Hochleistungsmutator, Mod. 1941



tiäre Ausgleichswicklung, in der die dritte Harmonische zirkuliert.

Für grössere Einheiten und höhere Betriebsspannungen kommt die grosse Doppereinheit (Fig. 11) für 2×200 kV, 500 A und 200 MW in Betracht.

Der Vollständigkeit halber sei auch auf die Grätz-Schaltung hingewiesen. Fig. 12 zeigt eine kleine Doppereinheit für 2×100 kV. Statt zweianodigen werden für diese Schaltung einanodige Mutatoren verwendet. Der Vorteil dieser Schaltung ist, dass bei gleicher Sperrspannung pro Mutator eine höhere Gleichspannung abgegeben werden kann.

Durch weitere Reihenschaltung von einanodigen Mutatoren kommt man zur grossen Doppel-Einheit (Fig. 13) für 2×200 kV. Der besondere Anreiz dieser Schaltung liegt darin, dass sie theoretisch weniger rückzündungsempfindlich ist, weil sich in einem Element eine Rückzündung nur dann auswirken kann, wenn alle untereinander in Reihe geschalteten Mutatoren gleichzeitig zur Bildung einer Rückzündung neigen.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass für die Umformung mit Mutatoren entweder die Gegendaktschaltung oder die Grätz-Schaltung vor allen

andern Schaltungen den Vorzug verdienen. Die kommende Entwicklung wird zeigen, ob eine der beiden Schaltungen der andern überlegen ist.

Nach dem Ueberblick über Mutatoreinheiten sei kurz auf die Umformung mit Maschinen eingegangen (Fig. 14). Um mit Motor-Generatoren genügend grosse Einheiten bauen zu können, muss man mehrere Gleichstrommaschinen mit einem gemeinsamen Antriebsmotor zu einer Einheit vereinigen. Das Bild zeigt eine Einheit für 50 000 V, 500 A zu 25 MW. Schaltungstechnisch (Fig. 15) sind der Aufbau der Mutatoreinheit und derjenige der Maschineneinheit gleichartig. Es ist etwas schwerer, mit Maschinen gleich grosse Einheiten zu bekommen, wie mit Mutatoren.

Nach der Behandlung der in Frage kommenden

Einheiten sei der Aufbau einer ganzen Endstation etwas näher betrachtet. Zu diesem Zweck sei von einem bestimmten Beispiel ausgegangen. Es sollen zwei Doppelgruppen zu 2×200 MW bei 400 kV zur Speisung von zwei Leitungssträngen in einer Endstation aufgestellt werden.

Das Schema Fig. 16 einer kompletten Endstation ist für Mutatoren und für Maschinen im Prinzip gleich aufgebaut. Wegen der kleineren Einheit bei der Lösung mit Maschinen ist die Lösung mit Mutatoren vorteilhafter.

Fig. 17 zeigt einen Schnitt durch eine komplette Endstation, ausgehend von den

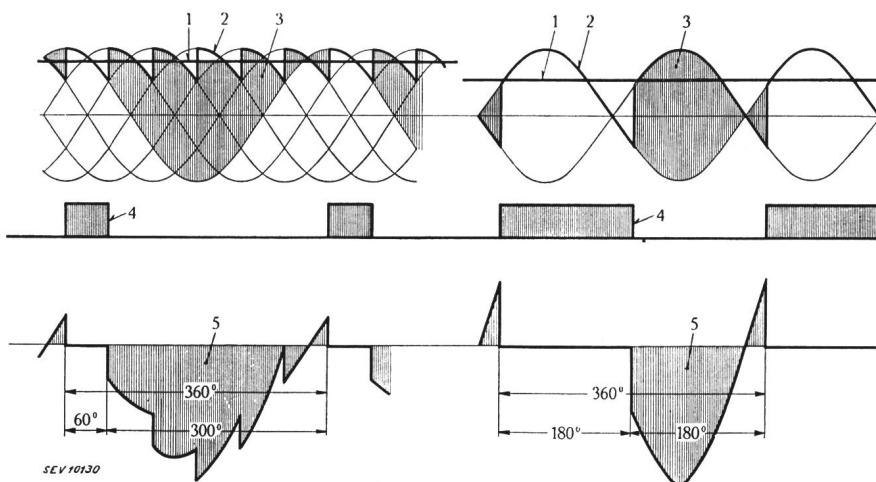


Fig. 9.

Strom- und Spannungsverhältnisse von Mutatoren

Links: Sechspannen-Schaltung. Rechts: Gegendakt-Schaltung

1 Mittlere Gleichspannung. 2 Phasenspannung. 3 Momentanwerte der Spannung Anode-Kathode (schraffiert). 4 Anodenstrom. 5 Spannung Anode-Kathode.

Die leistungsmässige Ausnützung des Mutators ist in Gegendaktschaltung günstiger als in Sechspannen-Schaltung.

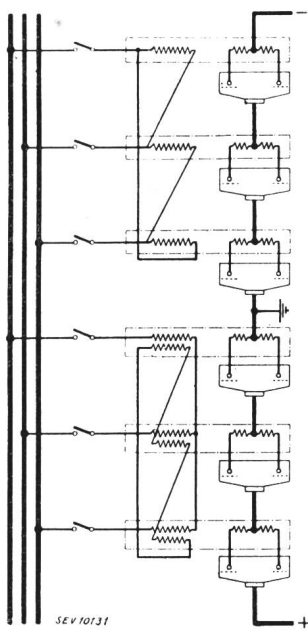


Fig. 10.

Kleine Doppel-Einheit in Gegentakt-Schaltung

für 500 A, 2 × 100 kV, 100 MW.

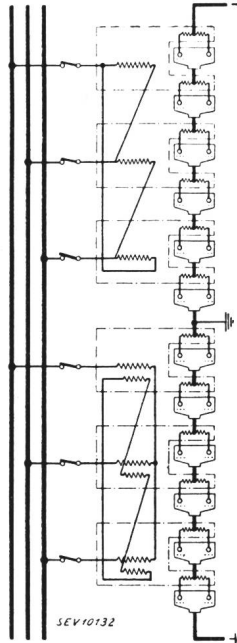


Fig. 11.

Grosse Doppel-Einheit in Gegentakt-Schaltung

für 500 A, 2 × 200 kV, 200 MW.

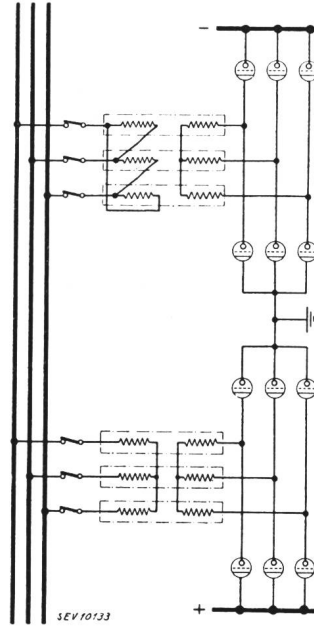


Fig. 12.

Kleine Doppel-Einheit in Grätz-Schaltung

für 500 A, 2 × 100 kV, 100 MW.

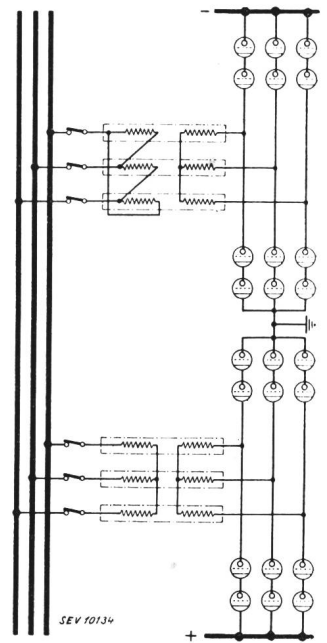


Fig. 13.

Grosse Doppel-Einheit in Grätz-Schaltung

für 500 A, 2 × 200 kV, 200 MW.

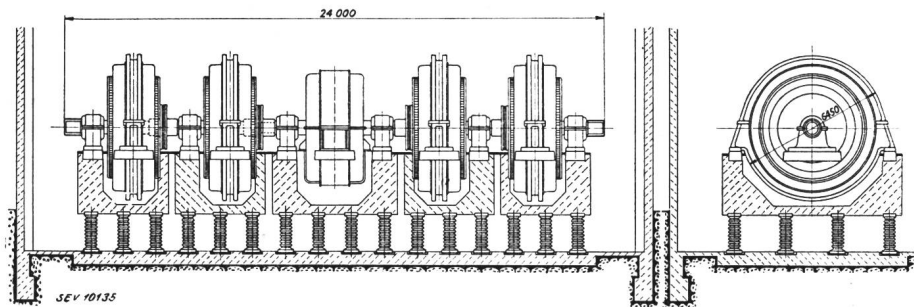


Fig. 14.

Maschineneinheit

500 A, 50 000 V, 25 MW.

Drehstromsammelschienen bis zur abgehenden Gleichstromleitung: Oben die Lösung mit Mutatoren, unten die Lösung mit Maschinen, im gleichen Maßstabe. Der Unterschied ist so gewaltig, dass die Lösung mit Maschinen als ganz aussichtslos erscheint. Ganz besonders überzeugend wird der Unterschied, wenn man die Preise der Endstation mit Mutatoren mit denjenigen der Endstation mit Maschinen vergleicht. Die Umformung mit Maschinen kostet mehr als das Vierfache der Umformung mit Mutatoren. Man muss daraus den Schluss ziehen, dass die Umformung mit Maschinen schon aus wirtschaftlichen Gründen für die Fernübertragung mit Gleichstrom nicht in Frage kommt.

3. Betriebsführung und Betriebssicherheit

Nachdem die einzelnen Elemente der Uebertragungsanlage behandelt worden sind, sei nochmals überlegt, wie die ganze Anlage arbeitet (Fig. 18). Auf der Sendestation wird mit Hilfe des Stufenschalters und der Gittersteuerung die Gleichspannung auf konstante Grösse, eventuell leicht kompondiert, einreguliert. Bei der Empfangsstation wird mit Hilfe der Gittersteuerung die ge-

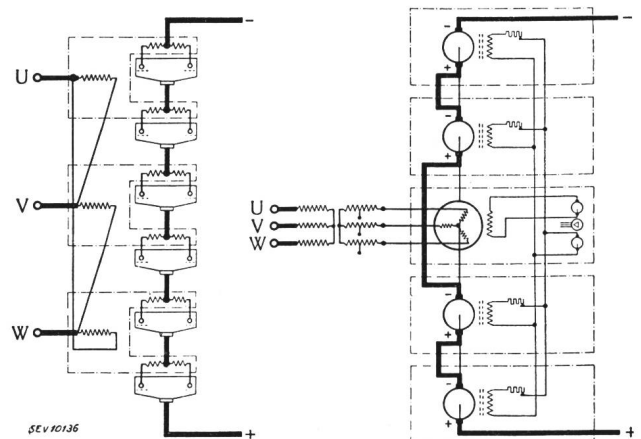


Fig. 15.

Vergleich einer grossen Mutatoreinheit mit einer Maschineneinheit

Links: Mutatorgruppe 200 kV, 500 A, 100 MW.
Rechts: Maschinengruppe 50 kV, 500 A, 25 MW.

wünschte Leistung eingestellt. Zur Blindstromkompensation, zur Spannungsregulierung und als Taktgeber ist eine Synchronmaschine aufzustellen. Es besteht noch die Variante, statt der Synchronma-

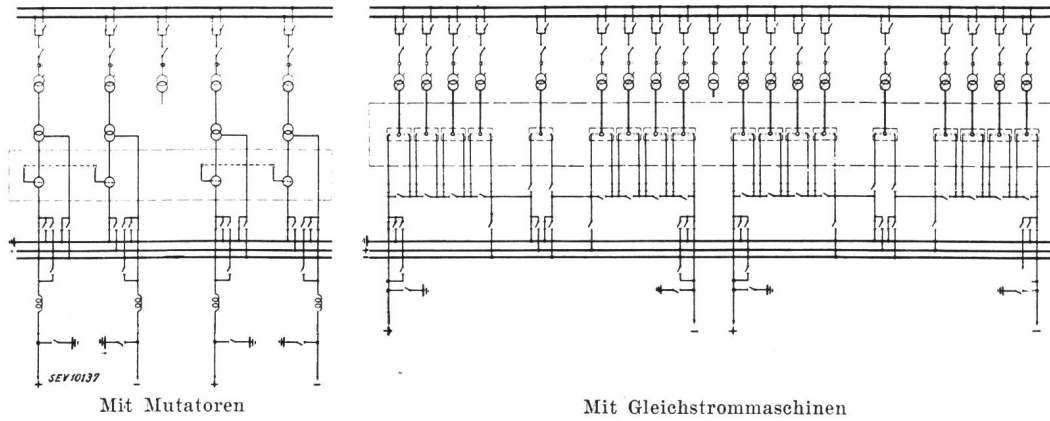


Fig. 16.
Schaltungschema einer Endstation für Gleichstrom-Übertragung mit zwei Stromkreisen zu 400 kV und 2 x 200 MW

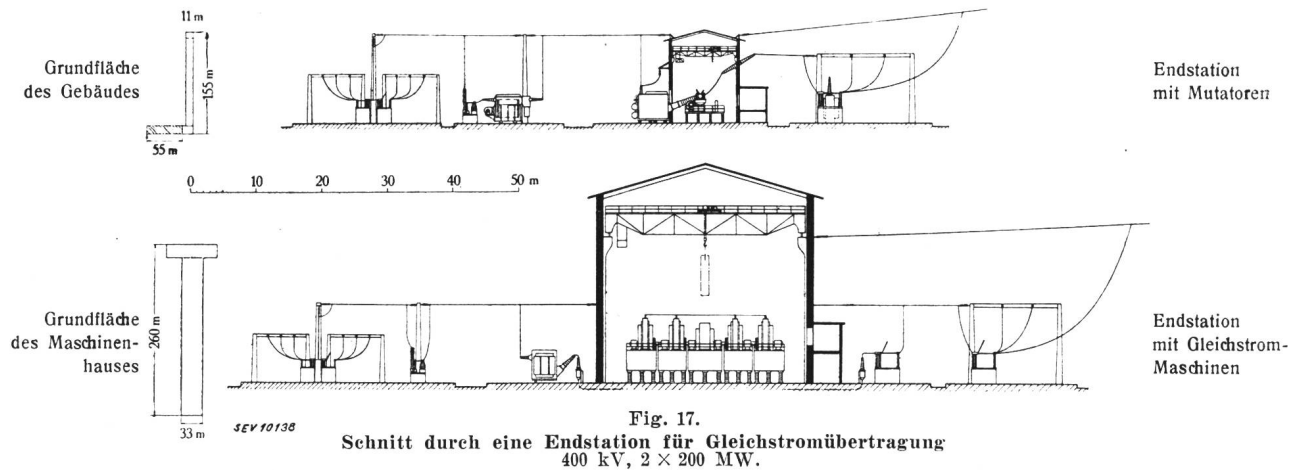


Fig. 17.
Schnitt durch eine Endstation für Gleichstromübertragung 400 kV, 2 x 200 MW.

schine statische Kondensatoren, die beispielsweise über einen Reguliertransformator geregelt werden, zu verwenden. Es können auch, wie Fig. 18 zeigt, beide Kompensationsmittel gleichzeitig angewendet werden. Je nach den über die Uebertragungsleitung verbundenen Drehstromnetzen können Reguliertransformatoren aufgestellt oder vollkommen entbehrt werden.

Obschon heute bereits an der Entwicklung von Hochspannungs-Gleichstromschaltern gearbeitet wird, muss noch bis zum Abschluss dieser Entwicklung auf solche Schalter verzichtet werden. Man erkennt aber aus Fig. 18, dass für die einfache Uebertragungsleitung solche Schalter noch nicht nötig sind. Jede Mutatorgruppe kann drehstromseitig abgeschaltet werden, so dass dadurch die Uebertragungsanlage geschützt wird. Ausserdem ist die Gittersteuerung der Mutatoren in der Lage, Störungen auf der Leitung und in den Mutatoren selbst so rasch zu löschen, dass die Drehstromschalter gar nicht zur Auslösung kommen. Bei Erdschluss auf der Leitung sprechen die Gitterrelais der betroffenen Gruppe an, schalten die Mutatoren der Sendestation auf Gleichstrom-Wechselstrom-Betrieb um, so dass die durch den Gleichstrom und die Induktivität der Leitung gebildete magnetische Energie in das Drehstromnetz der Sendestation rekuperiert wird. Das ergibt eine äusserst wirksame und rasche Löschung von Erdschlüssen, ohne dass die Drehstromschalter auslösen. Die Gitter-

steuerung der Empfängerstation bleibt dabei blockiert, weil ein Rückstrom infolge der Ventilwirkung der Mutatoren ausgeschlossen ist.

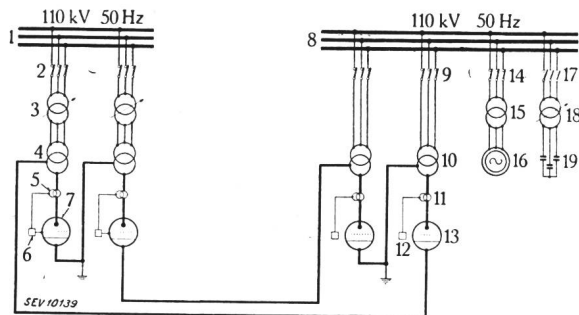


Fig. 18.
Prinzipschema einer Gleichstrom-Uebertragungsanlage
Links: Sendestation. Rechts: Empfängerstation.

- 1 Sammelschleife der Erzeuger
- 2 Schalter
- 3 Reguliertransformator
- 4 Mutatortransformator
- 5 Stromwandler
- 6 Gittersteuerung
- 7 Mutator
- 8 Sammelschleife der Verbraucher
- 9, 14, 17 Schalter
- 10 Mutatortransformator
- 11 Stromwandler
- 12 Gittersteuerung
- 13 Mutator
- 15 Transformator
- 16 Synchronmaschine
- 18 Reguliertransformator
- 19 Kondensatoren

Kurzschlüsse in den Mutatoren selbst, z. B. Rückzündungen, werden gelöscht, ohne dass der Betrieb davon etwas merkt. Durchgeführte Versuche haben gezeigt, dass infolge der Reihenschaltung der Mutatoren ganz besonders interessante Löscher-

dingungen für Rückzündungen entstehen. An einem der drei Mutatoren, einer kleinen Einheit (Fig. 6), wurden künstlich, mit Hilfe einer Stossvorrichtung, Rückzündungen eingeleitet. Aus den dabei aufgenommenen Oszillogrammen (Fig. 19 und 20) geht hervor, dass diese Rückzündungen weniger als eine Periode gedauert haben, und dass dabei der Gleichstrom nur wenig zurückgegangen ist. Bei den erwähnten Versuchen betrug die Gleichspannung 1380 V, der Gleichstrom 400 A und der Rückzündungs-

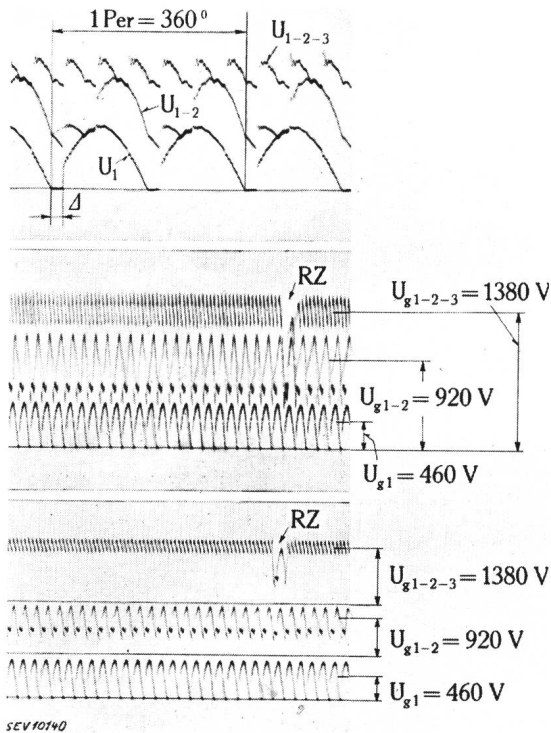


Fig. 19.

Spannungen der einzelnen Elemente einer kleinen Mutatorgruppe nach Fig. 6

Oben: Normalbetrieb. Mitte und unten: Rückzündung in einem Mutator und deren sofortige Löschung.

U_1 Spannung des ersten Mutators.
 U_{1-2} Spannung der ersten zwei Mutatoren.
 U_{1-2-3} Totale Spannung aller drei Mutatoren.

ungsstrom über 8000 A, d. h. mehr als das Zwanzigfache.

Im Prüffeld wurden somit zwei grundlegende Versuche durchgeführt: 1. die Untersuchung eines Elementes der Einheit auf Belastbarkeit und 2. Untersuchung dieser ganzen Einheit in bezug auf Betriebssicherheit.

Bevor eine grosse Uebertragungsanlage für mehrere 100 MW gebaut wird, erscheint es zweckmässig, mit zwei Einheiten, die eine im Wechselstrom-Gleichstrom-Betrieb, die andere im Gleichstrom-Wechselstrom-Betrieb, Grossversuche durchzuführen, um weitere Unterlagen über die Betriebsführung und die Betriebssicherheit einer Uebertragungsanlage zu gewinnen. Die für diesen Zweck erforderlichen Geldmittel sind von Brown Boveri schon bereitgestellt. Es ist aber bei der heutigen Energiemangel mit einigen Schwierigkeiten verbunden, solche Grossversuche durchzuführen. Wir hoffen aber, in absehbarer Zeit in der Lage zu

sein, über die Durchführung der Versuche und die erzielten Resultate näheres berichten zu können.

4. Rückwirkungen auf die Generatoren

Da die wechselstromseitigen Ströme von Mutatorgruppen nicht sinusförmig verlaufen, erhebt sich die Frage, welche Rückwirkungen auf die Generatoren, bzw. auf die am Netz angeschlossenen Synchronmaschinen zu erwarten sind. Namentlich interessiert die Frage, ob die Ausnützung der Gene-

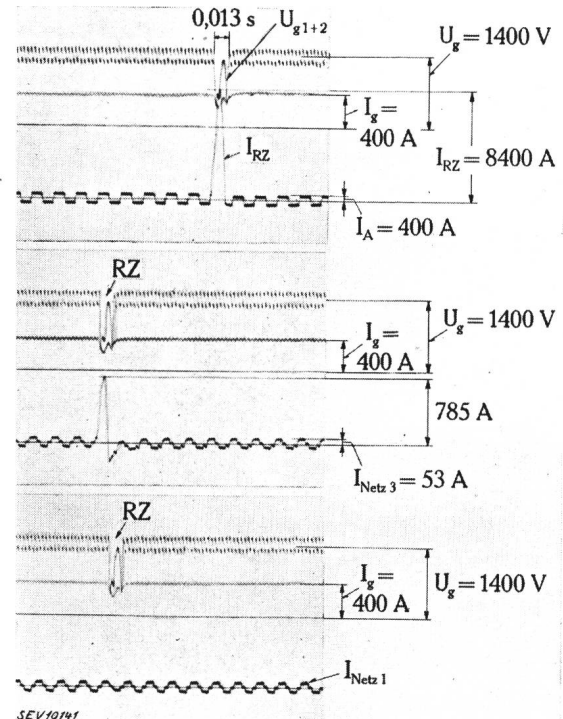


Fig. 20.

Gleichspannung und Wechselstrom einer kleinen Mutatorgruppe nach Fig. 6

U_g Gleichspannung. I_g Gleichstrom. I_A Anodenstrom.
 $I_{\text{Netz } 3}$ Netzstrom, einer durch die Rückzündung getroffenen Phase.
 $I_{\text{Netz } 1}$ Strom einer von der Rückzündung nicht berührten Netzphase.

Die rasche Löschung der Rückzündung ohne nennenswerte Senkung des Gleichstromes lässt Störungen vermeiden.

ratoren, welche Mutatorgruppen speisen, ebenso hoch sein kann, wie bei Speisung anderer Verbraucher. Dieses Problem kann von zwei Seiten in Angriff genommen werden:

1. Von der Mutatorseite.

Solche Massnahmen kommen namentlich dann in Frage, wenn es sich um bereits vorhandene Maschinen und um eine neu zu erstellende Mutatoranlage handelt.

2. Von der Maschinenseite.

Wie müssen neue Maschinen konstruiert werden, damit sie möglichst wenig empfindlich sind auf Mutatorbelastung?

1. Mutatorseitige Massnahmen

Es muss versucht werden, den Oberwellengehalt der Mutatorströme auf der Wechselstromseite möglichst herabzusetzen. Die bisher gebräuchliche Me-

thode ist eine Erhöhung der Phasenzahl durch Kombination mehrerer Gruppen. Wie schon gezeigt wurde, können mit zwei sechsphasigen Mutator-einheiten durch Kombination zwölfphasige Rückwirkungen erzielt werden (Fig. 10). Dieses Verfahren kann weiter fortgesetzt werden zu 24, ja

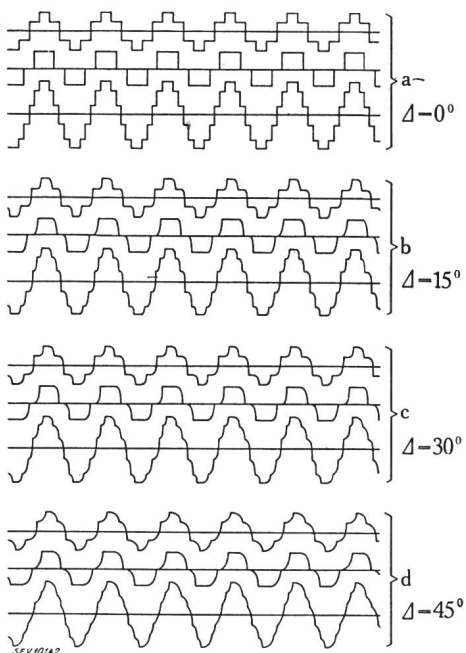


Fig. 21.

Primärströme und Netzstrom einer kleinen Doppereinheit nach Fig. 10

Mit steigendem Ueberlappungswinkel Δ wird die Kurvenform des Netzstromes stark verbessert.

eventuell 48 Phasen. Die Kunst besteht aber darin, die Phasenzahl nicht unnötig hoch zu machen. Erstrebenswert ist es, nicht höher als bis zu 12 Phasen gehen zu müssen.

Von weiterem Einfluss auf die Oberwellen ist die Ueberlappung der Anodenströme. Aus Fig. 21

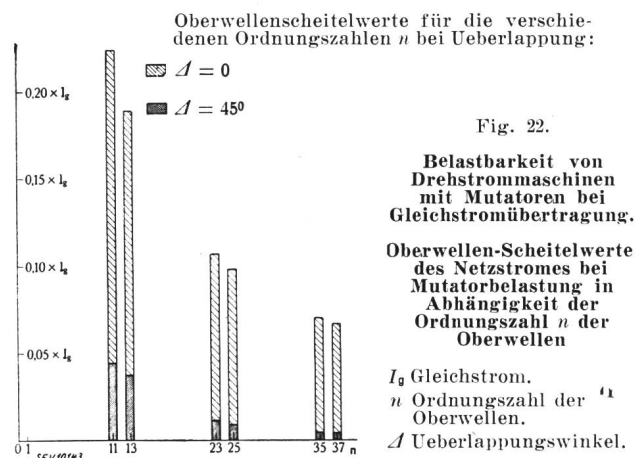


Fig. 22.

Belastbarkeit von Drehstrommaschinen mit Mutatoren bei Gleichstromübertragung.

Oberwellen-Scheitelwerte des Netzstromes bei Mutatorbelastung in Abhängigkeit der Ordnungszahl n der Oberwellen

I_0 Gleichstrom.
 n Ordnungszahl der ¹¹ Oberwellen.
 Δ Ueberlappungswinkel.

geht hervor, wie aus zwei gegeneinander versetzten Sechshephasengruppen ein zwölfphasiger Strom resultiert. Man erkennt, wie mit steigender Ueberlappung die Kurvenform des Netzstromes ganz wesentlich verbessert wird.

Fig. 22 zeigt, wie unterschiedlich der Oberwellengehalt einer Zwölfphasengruppe unter Vernachlässi-

gung der Ueberlappung und bei 45° Ueberlappungswinkel ausfällt.

Die Rückwirkungen auf die Generatoren äussern sich in gleicher Art, wie auf die Transformatoren durch Entstehung zusätzlicher Verluste. Da die Rechnung und Messung der Oberwellen für Transformatoren erheblich einfacher ist als für Generatoren, wurde vorerst der Einfluss von Oberwellen

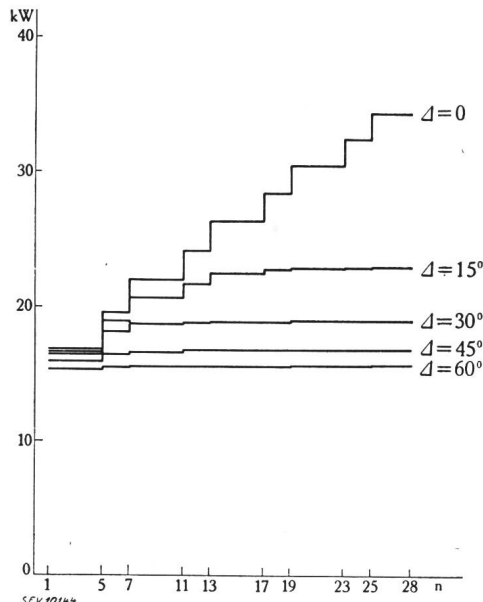


Fig. 23.

Zusätzliche Verluste in einem Mutatortransformator. Summe der Kupferverluste der n ersten ungeraden Oberwellen n Ordnungszahlen der ungeraden Oberwellen. Δ Ueberlappungswinkel.

Abgenommener Gleichstrom: 12 000 A. Temperatur: 17° Celsius. Transformatorleistung 11 620 und 16 100 kVA, Typ TRF Ku.

auf Transformatoren untersucht (Fig. 23). Die zusätzlichen Verluste in einer Transformatorsäule, welche durch die Summation der Verluste der einzelnen Oberwellen entstehen, nehmen mit steigendem Ueberlappungswinkel rasch ab. Insbesondere bewirkt eine Erhöhung des Ueberlappungswinkels eine starke Reduktion der durch die Oberwellen höherer Ordnungszahlen verursachten Verluste. Werden Generatoren fast ausschliesslich zur Speisung von Mutatoren verwendet, so wird der Ueberlappungswinkel grösser als wenn die Mutatorbelastung der Generatoren nur einen Bruchteil der Generatorbelastung ausmacht, weil dann die Streureaktanz der Generatoren voll zur Auswirkung kommen kann. Es ist dies gerade der Fall, der bei Uebertragungsanlagen zu erwarten ist.

2. Maschinenseitige Massnahmen

Die in den Generatoren entstehenden zusätzlichen Verluste sind im Stator direkt mit den zusätzlichen Verlusten in Transformatoren zu vergleichen. Im Rotor, namentlich in der Dämpferwicklung, können ebenfalls zusätzliche Verluste auftreten.

Steht der Konstrukteur vor der Aufgabe, einen Generator zu bauen, der gegen Oberwellen unempfindlich ist, so stehen ihm prinzipiell zwei Wege offen.

1. Einbau einer starken Dämpferwicklung, die so bemessen ist, dass das Feld im Spalt praktisch keine Oberwellen enthält. Eine solche Maschine wird bei Vernachlässigung des induktiven Spannungsabfalles im Stator sinusförmige Spannung abgeben. Sie hat aber etwas zusätzliche Verluste in der Dämpferwicklung. Diese zusätzlichen Verluste können durch geeignete Bemessung der Dämpferwicklung so klein gemacht werden, dass die Maschine trotzdem ihre volle Leistung bei Mutatorbelastung abgeben kann.

2. Der Konstrukteur kann auch eine Maschine ohne Dämpferwicklung, aber mit lamelliertem Rotoreisen bauen. Diese Maschine wird keine zusätzlichen Stromwärme-Verluste bekommen, dafür enthält das Feld der Maschine im Spalt alle Oberwellen des Netzstromes und es entsteht eine wesentlich stärkere Verzerrung der Klemmenspannung.

Diese zweite Lösung kann bei Generatoren in Frage kommen, die ausschliesslich Mutatoren speisen, wo es daher nicht auf eine besonders sinusförmige Spannung ankommt.

Die beiden Lösungen, starke Dämpferwicklungen oder überhaupt keine Dämpferwicklung, aber lamelliertes Rotoreisen, sind extrem verschieden. Es sei aber von vornherein betont, dass eine Mittellösung, d. h. eine zu schwach bemessene Dämpferwicklung, unter allen Umständen zu verwerfen ist. Eine zu schwache Dämpferwicklung ergibt hohe Verluste und gleichzeitig starke Verzerrung der Spannung.

Die beiden vorgeschlagenen Lösungen, mutatorseitige Massnahmen und maschinenseitige Massnahmen, gestatten auf alle Fälle, die Maschinen auch zur Speisung für Mutatoren voll auszunützen.

5. Schwachstromstörungen

Die Oberwellen der Gleichspannung und des Gleichstromes können durch statische und elektromagnetische Beeinflussung in Telephonleitungen und andern Schwachstromleitungen Störspannungen und Störströme hervorrufen. Diese Störungen sind um so stärker, je näher die Schwachstromleitung der Starkstromleitung liegt und je länger die Strecke der Parallelführung ist. Am ungünstigsten sind die Verhältnisse bei der einpoligen Gleichstromleitung mit Rückleitung durch die Erde. Sie sind dann ähnlich wie bei Gleichstrom-Bahnanlagen, wo ebenfalls einpolige Leitungen mit Rückleitung durch die Erde auf Schwachstromleitungen rückwirken können. Es ist dort durch Anbringen von Filterkreisen auf der Starkstromseite und durch passende Verdrillung der Schwachstromleitungen gelungen, die Störungen zu beseitigen. Es ist die Tatsache zu beachten, dass zur Beseitigung der Störungen sowohl auf der Starkstromseite als auch auf der Schwachstromseite gleichzeitig Massnahmen ergriffen worden sind. Es ist ein wesentliches Moment, dass beide betroffenen Teile zusammenarbeiten müssen, um die aus der gegenseitigen Nachbarschaft folgenden Störungen zu eliminieren.

Bei der Gleichstromübertragung liegen die Verhältnisse zum Teil verschieden, zum Teil ähnlich. Die Verschiedenheit besteht darin, dass bei Bahnanlagen auf der Starkstromseite nur aus Rücksicht auf die Schwachstromanlagen Filterkreise angebracht worden sind. Bei Gleichstromübertragung wird es auch mit Rücksicht auf die Starkstromanlagen nötig sein, Filterkreise anzuwenden. Man

muss sich vorstellen, dass die Oberwellen der Gleichspannung und des Gleichstromes bei sehr langen Leitungen wieder ein Wechselstromproblem darstellen, das nur mit Hilfe der exakten Theorie langer Leitungen gelöst werden kann. Bei Nichtbeachtung der langen Leitung können Erscheinungen auftreten, die eine unerwünschte Verstärkung der Spannungs- und Stromoberwellen zur Folge haben. Zusätzliche Spannungsoberwellen beanspruchen die Isolation der Leitung und der Transformatoren, und zusätzliche Stromoberwellen erhöhen die Verluste auf der Leitung, in den Transformatoren und Generatoren. Es ist daher schon aus diesem Grunde nötig, sowohl auf der Sende-, als auch auf der Empfangsseite der Uebertragungsleitung sorgfältig aufgebaute Filterkreise aufzustellen. Die Aehnlichkeit zwischen den Rückwirkungen auf Schwachstromanlagen bei Gleichstromübertragung und bei Gleichstrombahnanlagen liegt in den Massnahmen, die auf der Schwachstromseite vorgenommen werden müssen. Dies sind Aenderungen an Schwachstromleitungen, die bei verständnisvoller Zusammenarbeit zwischen Starkstrom- und Schwachstromunternehmungen ihre technisch einwandfreie Lösung finden werden.

6. Der wirtschaftliche Vergleich zwischen der Fernübertragung mit Drehstrom und Gleichstrom

Vor allem erhebt sich die Frage: Wie muss man vergleichen? Die Antwort lautet: Uebertragung einer gleichen Leistung, bei gleicher Distanz, bei gleicher Betriebssicherheit. Die Bedingung gleicher Betriebssicherheit ist schon sehr schwer zu erfüllen. Vergleicht man eine einsträngige Drehstromleitung (3 Leiter) mit einer einsträngigen Gleichstromleitung (2 Leiter), so muss man feststellen, dass die Gleichstromleitung betriebssicherer ist. Die Wahrscheinlichkeit einer Störung ist nämlich auf der Drehstromleitung infolge der höheren Leiterzahl grösser als auf der Gleichstromleitung. Bei der Gleichstromleitung braucht man zwei Endstationen, für Drehstromübertragung ausser den Endstationen noch je nach Leitungslänge eine bestimmte Zahl von Stützpunktstationen. Das sind ebenfalls Tatsachen, die zugunsten der Betriebssicherheit der Gleichstromübertragung sprechen. Immerhin muss erwähnt werden, dass die Stützpunktstationen und Endstationen bei Drehstromübertragung sich auf praktisch wohl-erprobte Konstruktionen stützen können, wogegen die Endstationen der Gleichstromübertragungsleitung ein Novum darstellen, für welches noch keine Betriebserfahrungen vorliegen. Um aus dieser Schwierigkeit für den Vergleich herauszukommen, sei vorausgesetzt, dass die mit der Neuartigkeit der Gleichstromendstationen verbundene Unsicherheit durch die grössere Störanfälligkeit der Drehstromleitung aufgewogen werde. Das heisst mit andern Worten: Es wird angenommen, dass einsträngige Gleichstromleitung und einsträngige Drehstromleitung die gleiche Betriebssicherheit aufweisen.

Man ist leicht geneigt zu fragen, bei welcher Betriebsspannung für Drehstrom und Gleichstrom

der Vergleich durchgeführt werden muss. Die Antwort lautet: Für jedes System ist die günstigste Betriebsspannung zu wählen, und zwar die wirtschaftlich günstigste Betriebsspannung.

Man wird sich fragen, welche Verluste man für beide Leitungen dem Vergleich zugrunde legen muss. Auch hier lautet die Antwort: Die Verluste sind von Fall zu Fall verschieden und so zu bestimmen, dass jeweils die wirtschaftlich günstigste Lösung zugrunde gelegt wird.

Was versteht man unter wirtschaftlich günstigster Lösung? Es ist diejenige, welche am Leitungsende auf der Seite der Empfangsstation den geringsten Preis pro kWh ergibt.

Damit ist die eigentliche Vergleichsbasis geschaffen: Gleiche Leistung, gleiche Distanz, gleiche Betriebssicherheit und für jedes System diejenige technische Lösung, welche den geringsten kWh-Preis am Leitungsende ergibt.

Zum skizzierten Rechnungsgang müssen über die Bedingungen am Anfang der Leitung, d. h. auf der Sendeseite, bestimmte Annahmen getroffen werden. Es betrifft dies den Preis pro kWh am Leitungsende, die jährliche Benützungsdauer der Anlage, einen bestimmten Zinsfuß für Verzinsung und Amortisation, Betrieb und Unterhalt. Es handelt sich somit um drei zu treffende Annahmen. Um möglichst alle praktisch vorkommenden Verhältnisse berücksichtigen zu können, müssen verschiedene Annahmen gemacht werden. Aus diesen Annahmen ergeben sich eine ganze Menge von Varianten. Es genügt aber, um die Rechnung zu vereinfachen, sie für zwei Extremfälle durchzuführen, nämlich die eine Rechnung unter Vereinigung aller günstigen Annahmen, die andere unter Vereinigung aller ungünstigen Annahmen. Die günstigen Annahmen sind: Niedrigster kWh-Preis, längste Benützungsdauer und geringster Zinsfuß für den Kapitaldienst. Die ungünstigen Annahmen sind höchster kWh-Preis, kürzeste Benützungsdauer und höchster Zinsfuß (Tab. I).

Berechnungsgrundlagen für den wirtschaftlichen Vergleich der Fernübertragung mit Drehstrom und Gleichstrom

Tabelle I.

	A. Günstige Annahmen		B. Ungünstige Annahmen	
	Drehstrom	Gleichstrom	Drehstrom	Gleichstrom
Energiepreis am Leitungsende Rp./kWh	0,7	0,7	1,4	1,4
Jährliche Benützungsdauer bei Vollast h	8000	8000	6000	6000
Verzinsung %	5	5	6	6
Amortisation, Unterhalt u. Betrieb %	4	3,5	5	4,5
Total Kapitaldienst %	9	8,5	11	10,5

Tab. II zeigt schematisch den abgekürzten Rechnungsgang für zwei bestimmte Beispiele, eines für Drehstrom und das andere für Gleichstrom. Die den Rechnungen zugrunde gelegten Preise für die Leitung und die Endstationen verstehen sich fertig montiert an Ort und Stelle (Preisbasis Sommer 1939). Solche Rechnungen mussten für verschie-

Berechnungsbeispiele

Tabelle II.

	Drehstrom	Gleichstrom
Energiepreis am Leitungsende Rp./kWh	0,7	0,7
Jährliche Benützungsdauer bei Vollast h/Jahr	8000	8000
Verzinsung, Amortisation, Unterhalt und Betrieb in % der Anlagekosten	9	8,5
Übertragungsdistanz km	800	800
Leistung am Leitungsende MW	400	400
Mastanordnung	Variante a	Variante f
Betriebsspannung kV	300	400
Nützlicher Leiterquerschnitt mm ²	300	450
Jährliche Verlustenergie der Leitung kWh	394 · 10 ⁶	254 · 10 ⁶
Jährliche Verlustenergie für beide Endstationen ¹⁾ kWh	53 · 10 ⁶	81,6 · 10 ⁶
Totale jährliche Verlustenergie kWh	447 · 10 ⁶	335,6 · 10 ⁶
Preis der Leitung Fr.	84,8 · 10 ⁶	66,4 · 10 ⁶
Preis einer Endstation »	7,95 · 10 ⁶	»
Preis einer Stützpunktstat. »	8,22 · 10 ⁶	»
Preis der Sendestation »	»	11,0 · 10 ⁶
Preis d. Empfängerstation inkl. Blindstromkompensation »	»	18,0 · 10 ⁶
Totale Anlagekosten »	133,58 · 10 ⁶	95,4 · 10 ⁶
Jahreskosten für Verzinsung, Amortisation, Unterhalt und Betrieb Fr.	12,02 · 10 ⁶	8,1 · 10 ⁶
Jahreskosten für Energieverluste »	3,12 · 10 ⁶	2,3 · 10 ⁶
Totale Jahreskosten »	15,14 · 10 ⁶	10,4 · 10 ⁶
Total abgegebene Jahresenergie kWh	3200 · 10 ⁶	3200 · 10 ⁶
Preis am Leitungsende Rp./kWh	1,173	1,02

¹⁾ Für Drehstrom inkl. Stützpunkte.

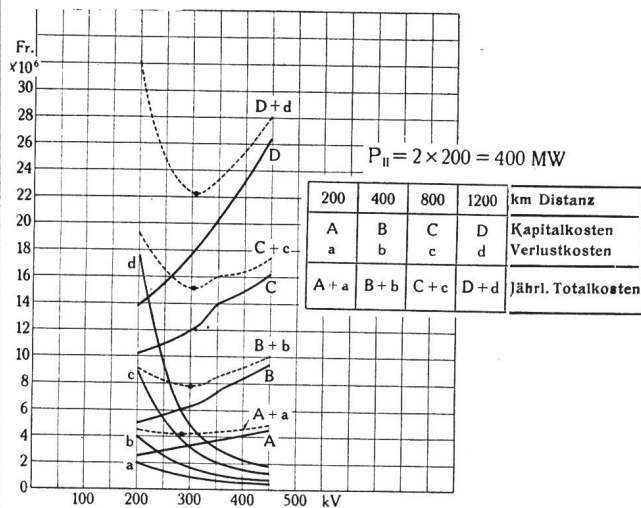


Fig. 24.

Beispiel der Bestimmung der wirtschaftlich günstigsten Spannung bei Drehstrom-Übertragung

Übertragungsleitung: 2 Stränge auf einem Mast (Tannenbaum).
 Jährliche Benützungsdauer bei Vollast: 8000 h. Verzinsung, Amortisation, Unterhalt und Betrieb: 9 % der Anlagekosten.
 Energiepreis am Leitungsende: 0,7 Rp./kWh.

dene Leiter- und Mastanordnungen, verschiedene Spannungen, verschiedene Leiterquerschnitte usw. wiederholt durchgeführt werden, um in jedem einzelnen Fall die wirtschaftlich günstigste Lösung zu ermitteln.

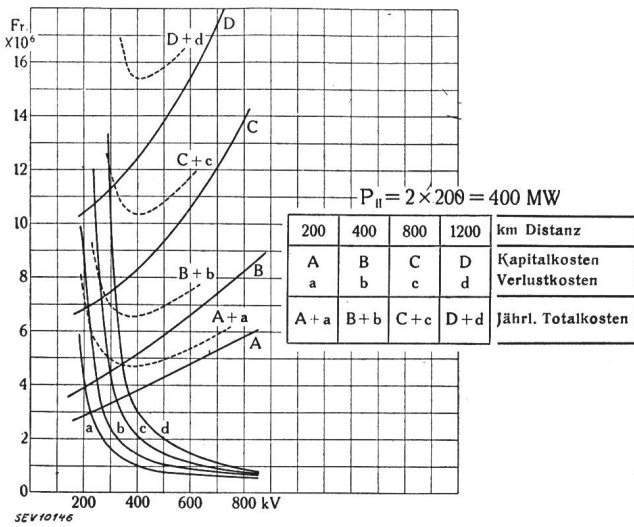


Fig. 25.

Beispiel der Bestimmung der wirtschaftlich günstigsten Spannung bei Gleichstrom-Uebertragung

Uebertragungsleitung: 2 Stränge auf einem Mast.
 Jährliche Benützungsdauer bei Vollast: 8000 h. Verzinsung, Amortisation, Unterhalt und Betrieb: 8,5 % der Anlagekosten.
 Energiepreis am Leitungsanfang: 0,7 Rp./kWh.

Aus dem Gang der Rechnung ist interessant zu sehen, wie die wirtschaftlich günstigste Spannung ermittelt wurde. (Fig. 24 für Drehstromübertragung und Fig. 25 für Gleichstromübertragung.) Die Auswertung dieser Rechnung ergab für verschiedene Leistungen die wirtschaftlich günstigste Spannung in Abhängigkeit der Distanz für Drehstrom und Gleichstrom (Fig. 26). Man erkennt, dass bei Drehstromübertragung die wirtschaftlich günstigste Spannung vor allem von der Leistung und

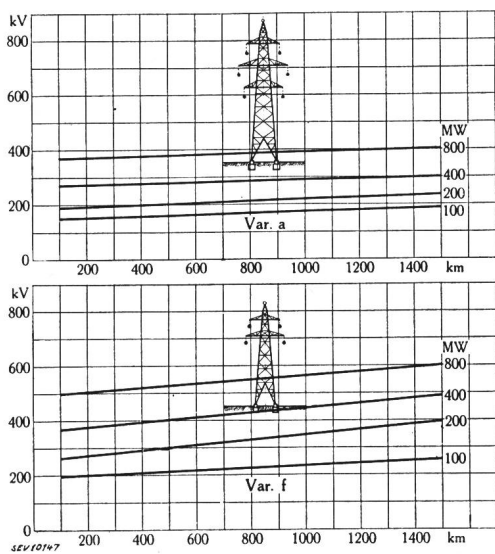


Fig. 26.

Verlauf der wirtschaftlich günstigsten Spannung für Drehstrom und Gleichstrom in Abhängigkeit der Distanz (Tabelle I)

Variante a: Drehstrom-Doppelleitung.
 Variante f: Gleichstrom-Doppelleitung.

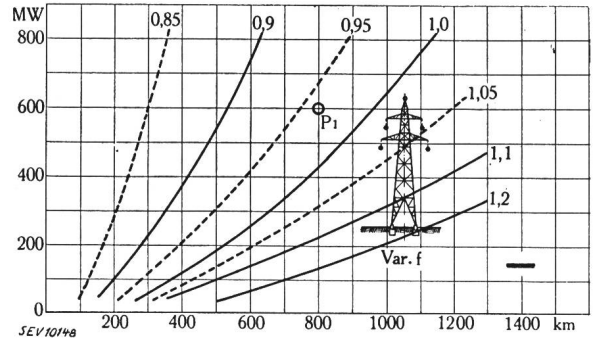
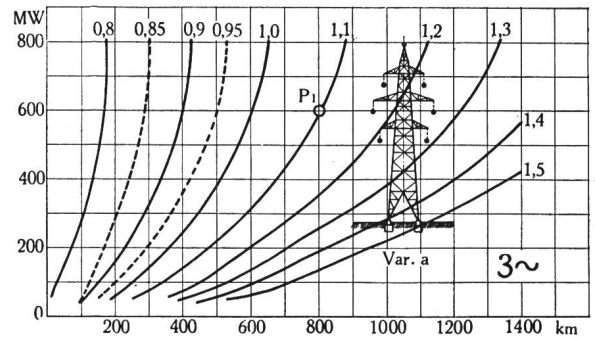


Fig. 27.

Kurven gleicher, minimaler Energiepreise in Rp./kWh am Leitungsende für Drehstrom (oben) und Gleichstrom (unten) unter Voraussetzung günstiger Annahmen (Tabelle I).

Die minimalen Energiepreise ergeben sich aus den wirtschaftlich günstigsten Lösungen und Spannungen bei jeder Leistung und Distanz.

nur ganz wenig von der Leitungslänge abhängig ist, wogegen bei Gleichstrom eine stärkere Abhän-

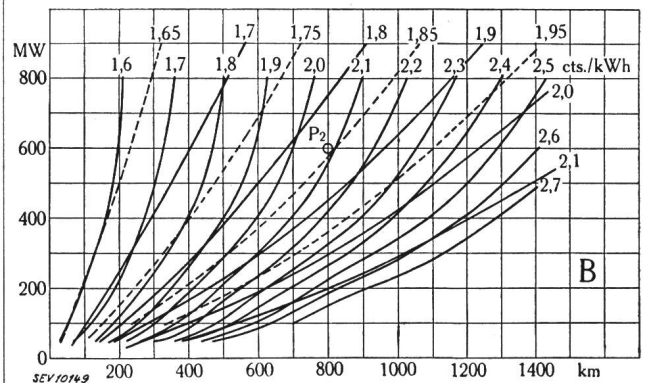
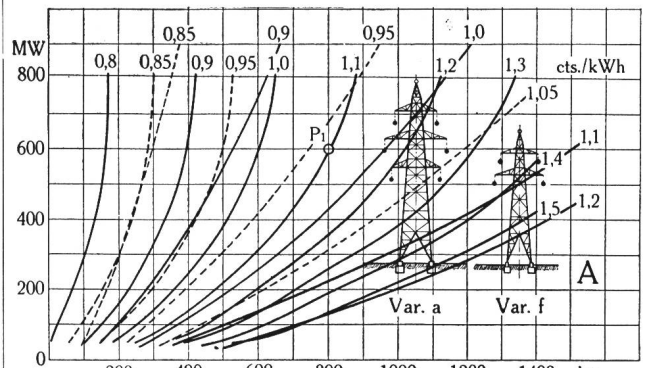


Fig. 28.

Bestimmung der Grenze der wirtschaftlichen Ueberlegenheit des Gleichstromes gegenüber dem Drehstrom

A Günstige Annahmen } Tabelle I
 B Ungünstige Annahmen }

gigkeit von der Leitungslänge zu erkennen ist. Dieser Umstand rührt davon her, dass bei Drehstrom Stützpunktstationen nötig sind, die einesteils zur

Die Resultate der Wirtschaftlichkeitsrechnung sind in Fig. 27 für eine Drehstrom-Doppelleitung und eine Gleichstrom-Doppelleitung auf Grund der

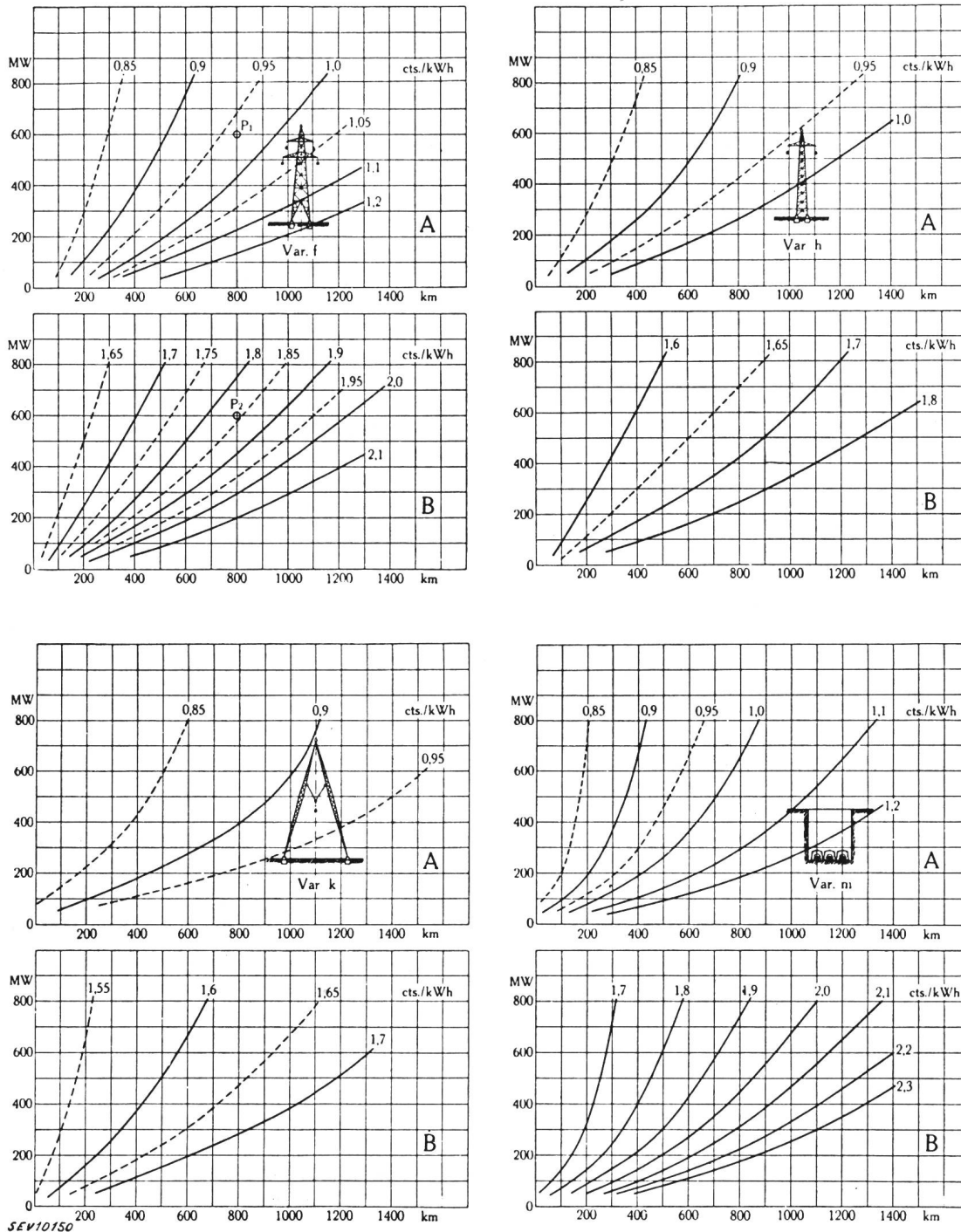


Fig. 29.

Beispiel der Wirtschaftlichkeit der Gleichstrom-Uebertragung für verschiedene Varianten

- A Günstige Annahmen
- B Ungünstige Annahmen } Tabelle I
- Variante f: Doppelsträngige zweipolige Leitung.
- Variante h: Einsträngige zweipolige Leitung.
- Variante k: Einpolige Leitung (Rückleitung durch die Erde).
- Variante m: Einsträngige zweipolige Kabelleitung mit 1 Reservekabel.

Die für die Kabelleitung gewählte Anordnung mit Reservekabel und die vorsichtige Wahl der dielektrischen Beanspruchung der Kabel ergeben für dieses gegenüber der Freileitung heute noch ein ungünstiges Bild.

Die einpolige Gleichstromleitung und Rückleitung durch die Erde ist die billigste Leitungsart.

Spannungshaltung mit herangezogen werden können, die andererseits aber auch die Kapitalkosten mit steigender Spannung heraufsetzen.

günstigen Annahmen zusammengestellt. Die Figur zeigt Kurven gleichen Energiepreises am Leitungsende, auf der Empfängerseite, in Abhängigkeit von

Leistung und Distanz. In diesem Resultat ist die ganze Wirtschaftlichkeitsrechnung enthalten. Man kann nun vergleichen, welcher Energiepreis sich für eine bestimmte Leistung und Distanz für Drehstrom und Gleichstrom ergibt. Man betrachte als Beispiel die Uebertragung von 600 MW auf 800 km Distanz (Punkt P_1). Es ergibt sich dabei ein Preisunterschied von 0,136 Rp./kWh zugunsten der Gleichstrom-Uebertragung. Dieser scheinbar kleinen Preisdifferenz kommt eine ganz andere Bedeutung zu, wenn man die damit verbundenen jährlichen Ausgaben zurückrechnet. Für 600 MW und 8000 h Benützungsdauer ($4800 \cdot 10^6$ kWh) ergibt ein Preisunterschied von 0,136 Rp. = 0,00136 Fr. eine jährliche Mehrausgabe von $6,5 \cdot 10^6$ Fr. Diese Mehrausgabe entspricht bei fünfprozentiger Verzinsung einem Kapital von $130 \cdot 10^6$ Fr. Dies zeigt, was die scheinbar kleine Differenz des Energiepreises am Leitungsende ausmacht.

Vor allem interessiert die Frage: Wo ist die Grenze der wirtschaftlichen Ueberlegenheit des Gleichstromes gegenüber dem Drehstrom in Abhängigkeit von Leistung und Distanz? Beim Uebereinanderlegen der Kurven gleichen Energiepreises für Drehstrom und Gleichstrom ergeben die Schnittpunkte entsprechender Kurven die gewünschte Grenze (Fig. 28). Die oberen Kurven gelten für die günstigen Annahmen und die unteren Kurven für die ungünstigen Annahmen. Fig. 28 lässt erkennen, dass die Schnitte entsprechender Kurven sehr flach sind. Das bedeutet, dass die Grenze nicht scharf ist, sondern dass ein Gebiet besteht, in dem Drehstrom und Gleichstrom wirtschaftlich gleichwertig sind. Man sieht aber ganz deutlich, dass die Schnittpunkte alle unterhalb 250 km liegen, d. h. für den vorliegenden Fall ist die Gleichstrom-Uebertragung oberhalb 250 km praktisch unabhängig von der Leistung wirtschaftlicher als die Drehstrom-Uebertragung. Dies gilt sowohl für die günstigen, als auch für die ungünstigen Annahmen.

Solche wirtschaftliche Vergleichsrechnungen wurden für mehrere Varianten in bezug auf Leiteranordnung für Drehstrom und Gleichstrom durchgerechnet. In Fig. 29 sind einige Gleichstrom-Varianten zusammengestellt. Vergleicht man dort die einsträngige Gleichstrom-Freileitung mit der entsprechenden Kabelleitung, so erscheint die Kabelleitung viel teurer als die Freileitung. Wie vorher erwähnt, ist ein Vergleich nur dann richtig, wenn die verglichenen Leitungen die gleiche Betriebssicherheit aufweisen. Diese Forderung ist aber im vorliegenden Fall aus zwei Gründen nicht erfüllt. Die Kabelleitung ist erstens mit Reservekabel ausgelegt, um die längere Dauer einer Reparatur bei der Kabelleitung gegenüber der Freileitung zu berücksichtigen. Es ist aber anzunehmen, dass eine Kabelleitung weniger störanfällig ist als eine Freileitung, d. h. die Kabelleitung ist betriebssicherer. Zweitens wurde die dielektrische Beanspruchung der Kabelleitung aus Rücksicht mangelnder Erfahrung mit Höchstspannungs-Gleichstromkabeln nie-

drig gewählt. Würde man die neuesten Forschungsergebnisse auf diesem Gebiete heute schon berücksichtigen, so könnte die Beanspruchung etwa um einen Drittel heraufgesetzt werden. Eine neue Berechnung der Kabelleitung, bei der diese zwei Faktoren berücksichtigt werden, ergibt dann eine geringere Preisdifferenz zwischen Kabelleitung und Freileitung. Aus Fig. 29 erkennt man auch, dass die einpolige Gleichstromleitung mit Rückleitung durch die Erde die billigste Leitung ist, die man überhaupt bauen kann. Weitere Vergleichsrechnungen mit andern Leitungsanordnungen haben, auf Grund der getroffenen Annahmen, ergeben, dass unabhängig von der Anordnung, je nach Fall, oberhalb 200...300 km der Gleichstrom dem Drehstrom wirtschaftlich überlegen ist.

Wenn es auch hier nicht möglich war, auf alle interessierenden Fragen einzugehen, so wurde doch versucht, die wesentlichsten Punkte hervorzuheben. Sie sind kurz zusammengefasst:

Die Erzeugung und Verteilung erfolgt wie bisher mit Drehstrom und die Uebertragung auf grosse Distanzen mit Gleichstrom.

Das Konstantspannungs-System ist dem Konstantstrom-System vorzuziehen.

Die direkte Mittelpunkterdung ist bei Gleichstrom vorteilhafter als die isolierte Leitung. Dabei sei besonders auf die einpolige Leitung mit Rückleitung durch die Erde hingewiesen.

Es wurde gezeigt, dass die Umformung von Drehstrom in Gleichstrom und die Rückumformung in Drehstrom vorteilhaft mit Mutatoren erfolgt.

Umformereinheiten für Leistungen, die für die Uebertragung in Frage kommen, sind bereits geschaffen und ihre Elemente sind erprobt. Grossversuche mit ganzen Einheiten stehen noch bevor.

Die Rückwirkungen auf Synchronmaschinen sind bei Durchführung der angegebenen Massnahmen so gering, dass die Maschinen mit ihrer vollen Leistung zur Speisung von Mutatoren herangezogen werden können.

Rückwirkungen auf Schwachstromanlagen können auf die gleiche Weise vermieden werden, wie sie schon bei Gleichstrom-Bahnanlagen beseitigt worden sind.

Der wirtschaftliche Vergleich zwischen Drehstromübertragung und Gleichstromübertragung erfolgt für gleiche Distanz und gleiche Leistung auf der Basis gleicher Betriebssicherheit, wobei für jedes System die wirtschaftlich günstigste technische Lösung gewählt werden muss.

Die Rechnungen haben sowohl für Drehstrom- als auch für Gleichstrom-Uebertragung für jede Leistung in Abhängigkeit der Leitungslänge eine wirtschaftlich günstigste Spannung ergeben.

Auf Grund der getroffenen Annahmen ist der Gleichstrom oberhalb 200...300 km dem Drehstrom wirtschaftlich überlegen, und zwar praktisch unabhängig von der Leistung.

Der heutige Stand der technischen Entwicklung der Gleichstrom-Uebertragung und ihre wirtschaftliche Ueberlegenheit gegenüber der Drehstromübertragung oberhalb 200...300 km sind die festen Grundlagen, auf denen die künftige Grossübertragung auf weite Entfernung mit Gleichstrom aufgebaut wird.

(Fortsetzung des Berichtes folgt.)