

Zeitschrift: Bulletin de l'Association suisse des électriciens
Herausgeber: Association suisse des électriciens
Band: 33 (1942)
Heft: 7

Artikel: Der Stand der Höchstleistungs-Übertragung in den Vereinigten Staaten von Amerika
Autor: Howald, W.
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-1056656>

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: 05.02.2025

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

REDAKTION:

Sekretariat des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins
Zürich 8, Seefeldstrasse 301

ADMINISTRATION:

Zürich, Stauffacherquai 36 ♦ Telephon 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^o 7

Mittwoch, 8. April 1942

Bericht über die Diskussionsversammlung des SEV

vom 13. Dezember 1941 in Zürich

über

Höchstleistungsübertragung auf grosse Distanzen

(Fortsetzung von Seite 158.)

Der Stand der Höchstleistungs-Uebertragung in den Vereinigten Staaten von Amerika

Von W. Howald, Zürich.

621.311.1(73)

Die Entwicklung und der Stand der Grossleistungsübertragung in den USA werden skizziert und es wird dargelegt, welche grosse Möglichkeiten der Weiterentwicklung in den USA bestehen. Ein grosses Projekt aus dem Jahre 1938 wird mit einigen Zahlen beleuchtet: Es handelt sich um die Uebertragung von 760 000 kW vom Columbia nach Chicago über 3000 km; eine kurze Rechnung zeigt, dass das Problem aus wirtschaftlichen Gründen nur mit Gleichstrom gelöst werden kann.

L'auteur trace brièvement l'état actuel du développement des lignes de transport d'énergie à grande puissance aux Etats-Unis et signale que ce développement est susceptible de prendre une importance toujours plus considérable dans ce pays. Il fournit les données numériques d'un grand projet datant de 1938 pour une ligne de 760 000 kW entre le Columbia et Chicago (3000 km). Un calcul succinct montre qu'une telle transmission ne peut être économiquement réalisée qu'en courant continu.

Das in der heutigen Diskussionsversammlung behandelte Thema der Uebertragung grosser Leistungen auf grosse Entfernungen berührt ein Problem, das sich im allgemeinen nicht mehr über die Verhältnisse eines einzigen Landes, sondern vielmehr über ganze Erdteile erstreckt. Es ist daher neben der rein technischen Lösung an politisch-wirtschaftliche Verständigung internationaler Natur gebunden.

Das gestellte Problem dürfte daher dort um so mehr Interesse finden und zu baldiger Lösung drängen, wo sich ein einzelner Staat über einen Erdteil erstreckt und wo die natürlichen energie-wirtschaftlichen Grundlagen von den Siedlungs- und industriellen Zentren abliegen. Diese Verhältnisse finden sich zahlreich in den USA; sie haben daher schon früh zu einer beträchtlichen Entwicklung der Höchstleistungsübertragung geführt¹⁾.

¹⁾ Im Bulletin SEV 1929, Nr. 15, S. 477 ff., behandelte Max Leo Keller «Die Uebertragung grosser Leistungen» vom theoretischen Standpunkte aus. Im 2. Teil seiner Arbeit (Bull. SEV 1929 Nr. 16, S. 517 ff.) wurde die Theorie auf ein praktisches Beispiel, «Die Grosskraftübertragung Conowingo», 220 kV, in USA, angewandt. Der Aufsatz enthält auch ein reichhaltiges Literaturverzeichnis zum Problem der Grosskraftübertragung.

I. Entwicklung

Die Elektrizitätswirtschaft der USA²⁾ hat bekanntlich eine ausserordentlich rapide Entwicklung durchgemacht und ganz speziell in den Industriestaaten des Nordostens zu einer Anhäufung von Energie produzierenden und Energie konsumierenden Anlagen geführt. Auf 11 % der Gesamtoberfläche des Landes leben dort mehr als 50 % aller Einwohner. Sie verfügen über 55 % der totalen installierten Leistung und verbrauchen auch die entsprechende Energie.

In diesen sich immer dichter ausbreitenden Netzen machte sich neben dem eigenen Bedürfnis der Uebertragung rasch das Verlangen nach der Möglichkeit gegenseitiger Unterstützung bei Störungen geltend. Der Kampf um wirtschaftliche Betriebsführung erforderte auch den Energieaustausch. So entstand hier in den letzten 10 bis 15 Jahren neben unzähligen 110-kV-Leitungen ein dichtes Netz von 132...184...220-kV-Leitungen, das wohl an die 10 000 bis 20 000 km aufweisen dürfte.

Dieses Netz ist in Fig. 1 dargestellt. Es sei dabei auch auf die Entwicklung der 220...287-kV-Leitun-

²⁾ Bull. SEV 1941, Nr. 20, S. 509.

gen im Westen aufmerksam gemacht. Wohl eine der ersten grossen Uebertragungsleitungen dürfte die 1913 gebaute 110-kV-Leitung vom Wasserkraftwerk Keokuk (Ia.) am Mississippi nach dem 350 km entfernten St. Louis sein.

Obschon die Schalter noch so primitiv waren, dass die Oelfüllung durch eine breite Spalte zwischen Schalterdeckel und -Kübel erblickt werden konnte, wurde an dieser Leitung doch schon die

wieder «betriebsbereit». Als Kuriosum ist dieser «Arc suppressor» in Fig. 2 dargestellt.

Die Einrichtung hat nicht ganz nach Wunsch funktioniert und wurde später abgetrennt; die Schalter sind dagegen immer noch im Betrieb.

2. 220-kV- und 287-kV-Systeme

Es war aber nicht der industrielle und durch nahe dem Verbraucher liegende Dampfkraftwerke versorgte Nordosten, der zuerst die Lösung des Uebertragungsproblems erforderte, sondern der äusserste Westen. Hier standen grosse Wasserkräfte an den Abhängen der Sierra Nevada zur Verfügung, jedoch 400...500 km von den Energiemärkten abliegend und durch Wüsten- und Gebirgszüge davon getrennt.

Schon anfangs der zwanziger Jahre baute die Southern California Edison die erste 220-kV-Leitung, um rund 300 000 kW von den Big-Creek-Kraftwerken am San-Joaquin-Fluss nach Los Angeles zu übertragen. Diese Leitung gab im Anfang zu vielen Schwierigkeiten Anlass. So gab es keine automatischen 220-kV-Schalter; die Leitung musste

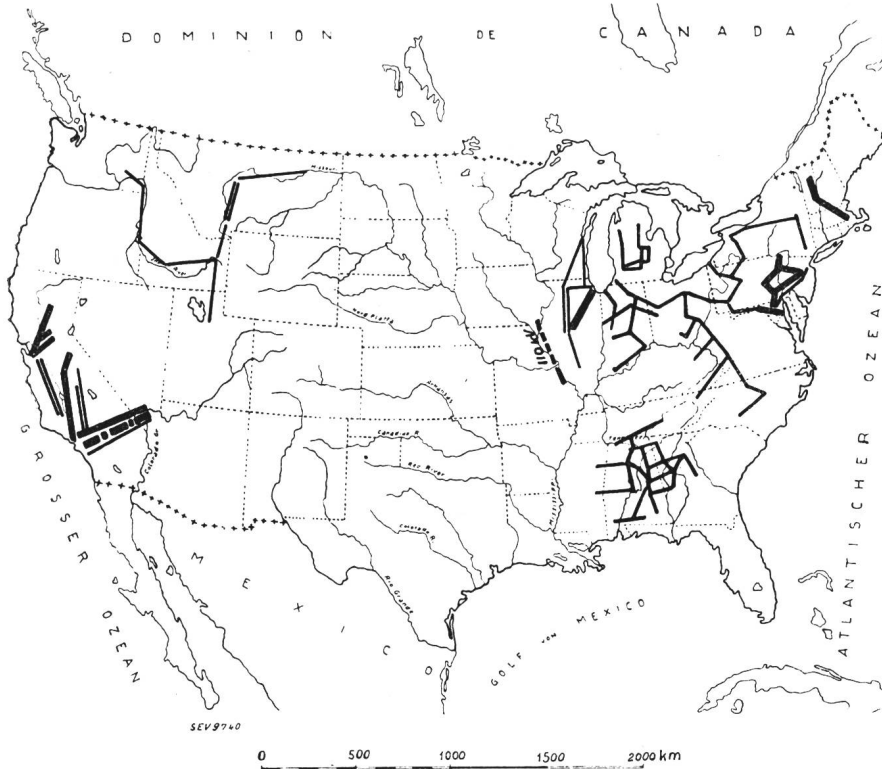


Fig. 1.
132...287-kV-Netz in USA.
- • - 287 kV
— 220 kV
- - - 132...184 kV

«Kurzschlussfortschaltung» versucht. Auf einem drehbaren Rad waren am Umfang Schmelzsicherungen montiert, die bei Störung automatisch an die kranke Phase gelegt wurden (das Netz wurde mit direkt geerdetem Nullpunkt betrieben). Der dadurch entstehende direkte Kurzschluss brachte die Sicherung explosionsartig zum Schmelzen (Werkleistung 135 000 kW), sollte gleichzeitig aber auch den auf der Leitung befindlichen Erdschlusslichtbogen löschen. Das Sicherungsrade drehte sich nach dem Vorgang um ein Element weiter und war

mit zugeschalteten Maschinen hochgefahren werden, da die Generatoreinheiten zu klein waren, um eine leerlaufende Leitung unter richtiger Spannung zu halten. Zur Spannungsregelung war die Leitung mehrfach unterteilt und in diesen Zwischenstationen mit grossen Synchronkondensatoren von 20 000 ...40 000 kVA Einheitsleistung ausgerüstet. Dies erschwerte die Betriebsführung.

Dann wieder machten sich die Adler unangenehm bemerkbar, die, auf den Querarmen sitzend, mit ihren Exkrementen Isolatorenüberschläge einleiteten.

Rasch folgte auch die Pacific Gas & Electric mit einer 220-kV-Leitung vom Pit River nach San Francisco. Relaischutz und Schalter wurden entwickelt, so dass heute beide Gesellschaften über ein ausgedehntes 220-kV-Netz von total ca. 2000...3000 km verfügen, dessen Betrieb wie derjenige jedes andern Hochspannungsnetzes geführt wird.

Im Jahre 1937 wurde die vom «Bureau of Water & Power» der Stadt Los Angeles erstellte 287-kV-Boulderleitung in Betrieb genommen. Auf zwei Strängen werden vorläufig 300 000 kW auf eine Distanz von 450 km übertragen.

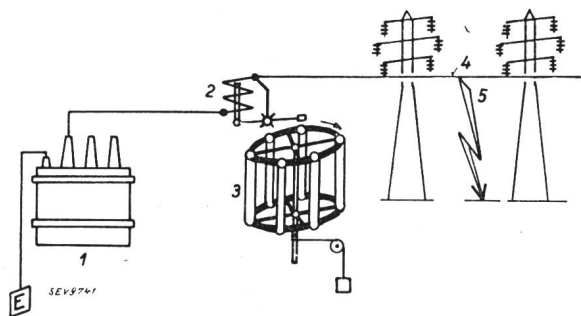


Fig. 2.
Nicholson Arc-Suppressor (1913).

- 1 Transformator (Nullpunkt geerdet).
- 2 Kurzschluss-Solenoid-Schalter.
- 3 Sicherungsgestell.
- 4 100-kV-Fernleitung.
- 5 Erdschluss (einphasiger Kurzschluss).

Die technischen Daten der Leitung sind:

Masthöhe Horizontalmast	ca. 33,5 m
Masthöhe Doppelmast	ca. 60 m
Mittlere Spannweite	300 m
Min. Abstand Phase gegen Erde	14 m
Phasenabstand am Horizontalmast	15 m
Phasenabstand am Doppelmast horizontal	12 m
Phasenabstand am Doppelmast vertikal	7,5 m
Länge der Isolatorenkette	3 m
Anzahl Isolatoren	24
Leiterquerschnitt Cu-Hohlseil	254 mm ²
Leiterdurchmesser	3,6 cm

Fig. 3 zeigt einen Mast in der Mojave-Wüste; die Leitung durchquert aber auch gebirgiges Terrain.

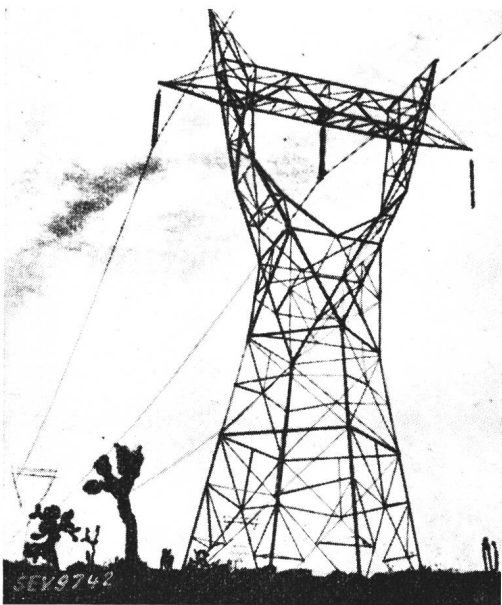


Fig. 3.

Tragmast der 287-kV-Leitung Boulder-Los Angeles.

Auf dieser Leitung wurden die ersten in den USA hergestellten ölarmen Schnellschalter aufgestellt. Sie enthalten immerhin noch 10 000 l Öl (dreipolige Gruppe) und beanspruchen eine Grundfläche von 7×15 m. Ihre Abschaltzeit wird mit 0,11 s angegeben (Fig. 4).

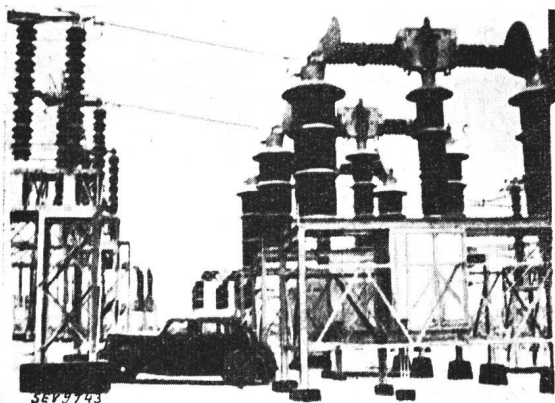


Fig. 4.

Ölarmen Schalter (Gen. El.) für 287 kV.

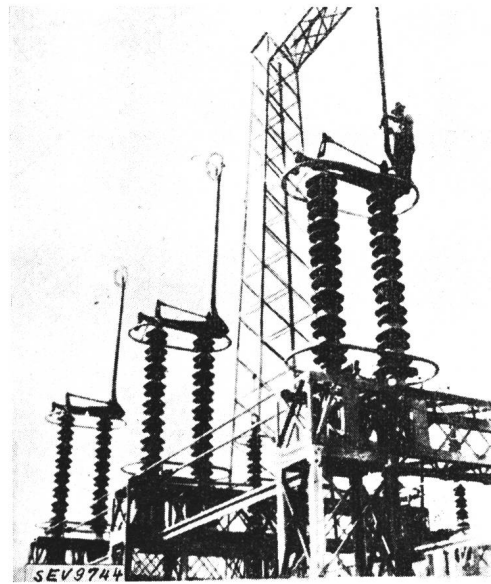


Fig. 5.
287-kV-Trenner.

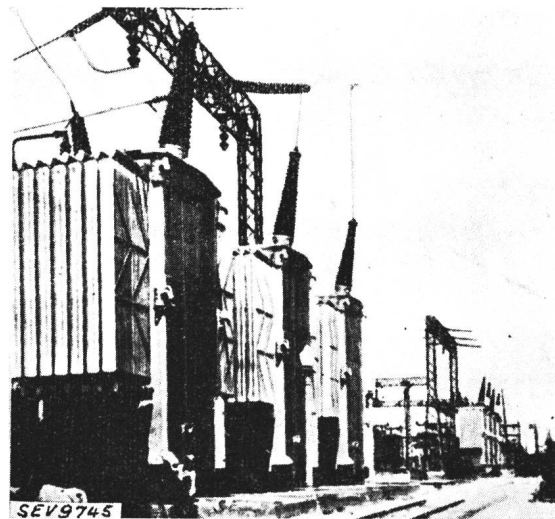


Fig. 6.
287/132-kV-Autotransformatoren.
3 × 80 000 kVA.

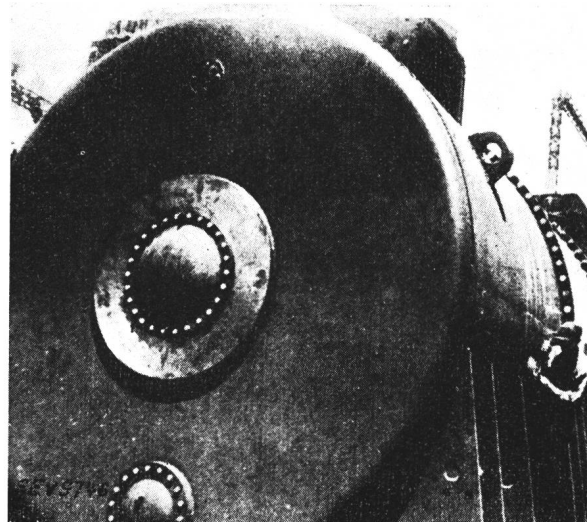


Fig. 7.

60 000-kVA-Synchronkondensator für Freiluftaufstellung mit Wasserstoffkühlung.

Dass auch die übrigen Apparate ungewöhnliche Grösse annehmen, zeigen der Trenner Fig. 5 und die Ansicht der Einphasentransformatoren an der Endstation (Fig. 6), die bis auf 80 000 kVA überlastbar sind (240 000 kVA für die Gruppe).

Die Leitung ist in drei gleiche Teilstrecken unterteilt. Bei Störungen wird automatisch das kranke Teilstück ausgeschaltet und der Betrieb auf der andern Leitung aufrecht erhalten. Zur Stabilisierung und Spannungshaltung dienen vier auf der Empfangsseite aufgestellte Synchronkondensatoren von je 60 000 kVA Leistung. Wie Fig. 7 zeigt, sind sie vollständig gekapselt, im Freien aufgestellt und mit Wasserstoffkühlung versehen.

3. Zukunftsmöglichkeiten

So bedeutend die geschilderten Anlagen auch sind und so sehr sie bahnbrechend waren, so sind

und der infolge der Riesenprojekte der Regierung in Zukunft möglichen Produktion betrachtet, so sieht man deutlich den konzentrierten Energiemarkt im Nordosten, dessen Bedürfnisse fast ausschliesslich durch thermische Erzeugung gedeckt werden.

Im Süden in rund 1000 km und besonders im Nordwesten in über 3000 km Entfernung finden sich dagegen riesige potentielle Energiemengen (am Columbia allein 60...70 Milliarden kWh bei etwa 9 Millionen kW Leistung), denen die Absatzmöglichkeit fehlt. Diese Energie würde genügen, alle Dampfkraftwerke des Ostens stillzulegen und den doppelten Bedarf des Jahres 1939 zu decken.

Wohl wird gegenwärtig am Columbia und am Tennessee die Aluminiumerzeugung forciert. Nach

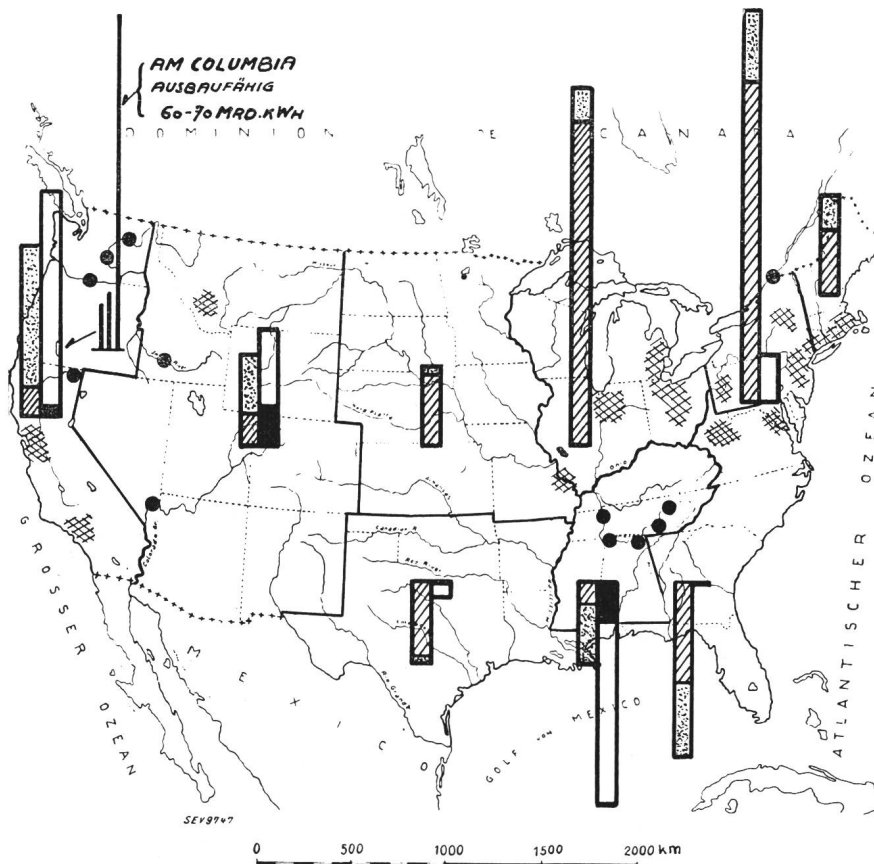


Fig. 8. Mögliche Energieproduktion und Verbrauch, 1939, in USA.



den veröffentlichten Statistiken betrug die Produktion 1939 rund 140 000 t, deren Herstellung ca. 3,5 Milliarden kWh erforderte. Nach Mitteilungen in der Fachliteratur soll sie bis 1942 eine Steigerung um das Fünffache erfahren, womit der Energieverbrauch auf 16...18 Milliarden kWh steigen würde. Dies wird vorläufig die ganze Produktion aller neu in Betrieb gesetzten Maschinen beanspruchen. Für die Zukunft stehen jedoch noch grosse Energiemengen ungenutzt zur Verfügung.

Im Nordwesten leben ca. 1,4 Millionen Einwohner auf einem Gebiet vom dreieinhalbfachen der Schweiz und verbrauchten (1939) gegen 8 Milliarden kWh; am Tennessee sind es 2,5 Millionen Einwohner mit über 4 Milliarden kWh Verbrauch auf etwa 100 000 km² Fläche. Sie dürften auch unter Beizug grosser energieverbrauchender Industrien nie eine Verbrauchssteigerung aufweisen, die eine Ausnutzung der erwähnten Produktionsmöglichkeiten gestattet.

Bereits im Herbst 1938 ist daher in der amerikanischen Fachwelt das Problem der Energie-Uebertragung mittels Höchstspannungsgleichstrom vom Columbia nach Chicago auf 3000 km Entfernung diskutiert worden. Es wurde damals mit folgenden Daten gerechnet:

ihre Auswirkungen doch klein gegenüber den Aufgaben, die die Zukunft stellen wird. Wenn man die Darstellung (Fig. 8) des Energieverbrauches 1939

Zu übertragende Leistung	760 000 kW
Zu übertragende Energiemenge	5 300 000 000 kWh
Belastungsfaktor	0,8

Leitungskosten:	
2200 Meilen zu \$ 30 000	66 000 000 \$
Kosten f. Sende- u. Empfangsstation:	
1 800 000 kW zu \$ 13	24 000 000 \$
Total	<u>90 000 000 \$</u>

Die Uebertragungskosten wurden daraus zu etwa
 0,1 cent/kWh für die Leitung,
 0,05 cent/kWh für die Umformung,
0,15 cent/kWh total

berechnet. Bei einem Gestehungspreis ab Kraftwerk von etwa 0,2 cent/kWh würden somit die Energiekosten in Chicago nach dieser Berechnung auf rund 0,35 cent/kWh zu stehen kommen.

Unter der Annahme, dass die Wechselstromübertragung auf diese Distanz überhaupt möglich ist, müsste infolge der erhöhten Aufwendungen für die auf der Leitung zwischengeschalteten Synchronkondensatoren mit mindestens 0,27...0,3 cent/kWh gerechnet werden. Dies entspricht einer jährlichen

Mehrausgabe von rund \$ 8 000 000 gegenüber der Gleichstromübertragung. Die grösseren Verluste sind dabei noch nicht berücksichtigt. Die Energiepreise am Leitungsende würden damit auf fast 0,5 cent/kWh steigen. Sie hätten mit Erzeugungskosten in örtlichen Dampfkraftwerken von etwa 0,3 cent/kWh zu konkurrieren. Die Drehstromübertragung in ihrer heutigen Form wird also für diese Verhältnisse nie konkurrenzfähig sein, wenn nicht die Kohlenkosten, die gegenwärtig etwa 0,14...0,22 cent/kWh ausmachen, entsprechend zunehmen.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass das Problem der Drehstromübertragung grosser Leistungen auf Distanzen von 500 km in den USA mit Spannungen bis 287 kV betriebssicher und ökonomisch gelöst ist und für die gegenwärtigen Verhältnisse befriedigt. Die Zukunft verlangt aber Uebertragungen grössten Ausmasses auf viel weitere Entfernungen und dies zu Preisen, die mit der immer noch fortschreitenden Dampftechnik in Konkurrenz treten können.

Freileitungsbau für Drehstrom und Gleichstrom für die Uebertragung grosser Leistungen

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

621.315.17

Der Autor legt dar, dass die Anlagekosten von Hochspannungsleitungen weitgehend von der geforderten Betriebssicherheit der Uebertragung abhängen. Er legt zur Beurteilung der verschiedenen Leitungsbauarten eine Vergleichsbasis fest und diskutiert mehrere Leiteranordnungen und Isolationsmittel unter Berücksichtigung der Betriebssicherheit. Für die zukünftige Höchstleistungsübertragung mit Gleichstrom erwähnt er neue Möglichkeiten des Leitungsbaues.

Für die Leitungsberechnung ist wesentlich die Dimensionierung der Leiter und ihre Anordnung mit Rücksicht auf die Koronaverluste; bei Wechselstromleitungen spielt ausserdem der Skineffekt eine Rolle. Diese Verhältnisse werden für die Wechselstromübertragung durch Kurven erläutert.

Der Autor stellt ferner für Gleichstrom- und Drehstromleitungen die spezifischen Anlagekosten in Funktion der Betriebsspannung für verschiedene Leiter-Arten und -Anordnungen graphisch dar, woraus sich die wirtschaftlichste Bauart bei den zugrunde gelegten Baustoffen und Materialpreisen leicht bestimmen lassen.

L'auteur montre que les frais d'établissement d'une ligne à haute tension dépendent fortement de la sécurité d'exploitation exigée pour la transmission. Il pose une base de comparaison entre les divers genres de lignes, et discute de plusieurs dispositions de conducteurs et de divers isolement en considérant la sécurité de fonctionnement. Il mentionne de nouvelles possibilités de construire les lignes pour la transmission future de grandes puissances par courant continu.

Le dimensionnement et la disposition des conducteurs, en tenant compte des pertes par effet de couronne, sont les facteurs essentiels du calcul d'une ligne; dans les lignes à courant alternatif l'effet pelliculaire joue aussi un grand rôle. Ces relations sont représentées par des courbes pour les transmissions par courant alternatif.

L'auteur donne, en outre, des diagrammes des frais d'installations par kilomètre de lignes à courant continu et de lignes à courant alternatif en fonction de la tension de service pour différents genres et dispositions des conducteurs. Ces courbes permettent de déterminer facilement la construction la plus économique étant donné le matériel employé et son prix.

1. Einleitung

Immer grössere Kreise kommen zur Ueberzeugung, dass die Kohlenlager der Erde nicht dazu verwendet werden sollten, um mit einem Wirkungsgrad von 10...20 % in elektrische Energie übergeführt zu werden, solange unausgenützte Wasserkräfte zur Verfügung stehen, denn es gehen dabei ausser enormen Wärmemengen auch noch die unersetzlichen chemischen Werte der Kohle verloren. Nun liegt aber ein grosser Teil der noch nicht ausgebauten Wasserkräfte der Erde in Gegenden, wo heute noch keine Absatzmöglichkeit für sie besteht. Sollen sie erschlossen werden, so müssen entweder Industrien in ihrer Nähe angesiedelt werden, was zum Teil heute geschieht, oder es müssen lange Uebertragungsleitungen gebaut werden, um die er-

zeugte elektrische Energie bestehenden Absatzzentren zuzuführen.

Die in hydraulischen Anlagen erzeugte Energie muss dann im Absatzgebiet in Konkurrenz treten mit der in thermischen Kraftwerken nach Bedarf erzeugbaren, zuverlässigen Energie. Die Bewertung der elektrischen Energie hängt aber in hohem Masse davon ab, ob diese Energie mit grosser Zuverlässigkeit jederzeit und überall, wo sie der Abnehmer wünscht, zur Verfügung steht.

Es soll hier von den sich aus dieser Lage ergebenden Problemen nur der Teil geprüft werden, der sich auf die Uebertragung der hydroelektrischen Energie über lange Leitungen bezieht. Die eingehende Behandlung dieses Teilproblems ist nötig, weil die Wirtschaftlichkeit und die Betriebs-