Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke

Band: 33 (1942)

Heft: 5

Rubrik: Bericht über die Diskussionsversammlung des SEV : Höchstleistungsübertragung auf grosse Distanzen

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: 05.12.2025

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

SCHWEIZERISCHER ELEKTROTECHNISCHER VEREIN

BULLETIN

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° 5 | Mittwoch, 11. März 1942

Bericht über die Diskussionsversammlung des SEV

vom 13. Dezember 1941 in Zürich

über

Höchstleistungsübertragung auf grosse Distanzen

Am 13. Dezember 1941 fand unter dem Vorsitz von Herrn Dr. h. c. **M. Schiesser**, Präsident des SEV, in Zürich eine interessante Tagung des SEV über Höchstleistungsübertragung auf grosse Distanzen statt. Die Versammlung war von etwa 300 Interessenten besucht, worunter sich trotz der schwierigen Reiseverhältnisse eine Anzahl Gäste aus dem Ausland befanden.

Nach einer Einführung durch den Vorsitzenden wurden folgende Referate gehalten:

1. **Probleme der Drehstrom-Energieübertragung bei sehr grossen Leistungen und Distanzen,** von Dr. *W. Wanger*, Baden.
2. **Probleme der Gleichstrom-Energieübertragung bei sehr grossen Leistungen und Distanzen und der wirtschaftliche Vergleich zwischen der Fernübertragung mit Drehstrom und Gleichstrom,** von *Ch. Ehrensperger*, Baden.
3. **Der Stand der Höchstleistungsübertragung in Nordamerika,** von *W. Howald*, Zürich.
4. **Der Freileitungsbau bei Gleichstrom und Drehstrom für die Uebertragung grosser Leistungen auf grosse Distanzen,** von *R. Voegeli*, Baden.
5. **Möglichkeiten der Fernübertragung grosser Leistungen durch Kabel,** von *P. Müller*, Brugg.
6. **Weitere Beiträge und Diskussion.**

Wir beginnen in dieser Nummer mit der Veröffentlichung des Berichtes, und zwar mit der Einführung des Vorsitzenden und dem Referat des Herrn Dr. Wanger. Die übrigen Referate werden in den folgenden Nummern des Bulletin erscheinen.

Von allen Referaten wird in absehbarer Zeit ein Sonderdruck gemacht; Bestellungen hierauf nimmt das Sekretariat des SEV, Seefeldstrasse 301, Zürich 8, entgegen.

Einführung

Der Vorsitzende, Herr Dr. h. c. *M. Schiesser*, Präsident des SEV, gibt folgende Einführung:

Sehr verehrte Gäste, meine Damen und Herren, ich begrüsse Sie zu unserer heutigen Diskussionstagung über «Höchstleistungsübertragung auf grosse Distanzen» und heisse Sie dazu herzlichst willkommen. Ich begrüsse vor allem auch unsere Gäste, die aus dem Ausland gekommen sind, um an unserer Tagung teilzunehmen und uns heute mit ihrem Besuch beehren. Ich begrüsse darunter ganz besonders eines der ältesten Mitglieder unseres Vereins, Herrn Prof. Dr. Niethammer aus Prag, der sich im Auftrag seiner Regierung mit den Fragen der Grossleistungsübertragung befasst.

Das Problem, das wir behandeln wollen, ist kein Problem von lokaler Bedeutung; es umfasst das Interesse ganzer Kontinente, vielleicht sogar einmal das Interesse mehrerer Kontinente zusammen. Es ist also in diesem Sinne ein Problem der Zukunft von allergrösstem Ausmass.

An einer im letzten Frühling in diesem Haus abgehaltenen Diskussionstagung habe ich Ihnen schon gesagt, dass wir beabsichtigen, auf Ende des Jahres dieses Problem hier zu behandeln. Ich bin Ihnen vielleicht eine kleine Erklärung schuldig, warum wir das tun. Seit vielen Jahren habe ich mich persönlich mit diesem Problem beschäftigt. Ich habe dann vorgeschlagen, dass es meine letzte Arbeit sein solle, das Thema an einer Diskussionstagung des SEV zu behandeln, nachdem ich nach acht Jahren jetzt vom Präsidium zurücktrete. Ich habe also, wenn Sie wollen, einmal eine eigene Liebhaberei zur Diskussion gestellt — *eine* Liebhaberei darf man innert acht Jahren vielleicht schon einmal behandeln, besonders eine Liebhaberei von solcher Tragweite. Es ist also, wenn Sie wollen, eine Art Schwanengesang.

Ich möchte nun einige kurze Bemerkungen zur Problemstellung dieser Höchstleistungsübertragung machen, damit Sie alle mehr oder weniger sehen, welche Punkte von Bedeutung sind.

Früher oder später wird einmal eine Zeit kommen, da die Kohle rar wird oder der Synthese reserviert werden muss, und man wird dann mehr und mehr auf die hydraulischen Energiequellen angewiesen sein. Nun haben diese hydraulischen Energiequellen neben den gewaltigen Vorteilen, die sie uns bringen, meistens den Nachteil, dass sie von den Verbrauchszentren sehr weit abgelegen sind. Damit kommen wir gleich zur Hauptfrage, der

Frage des Energie-Transportes, und zwar des Transportes von Leistungen von vielen Hunderttausend kW auf Distanzen von 1000 und mehr km. Jedes Transportproblem ist weiter nichts als ein rein wirtschaftliches Problem, und der Techniker ist darin vorerst nur einmal der Diener der Wirtschaft und der Wirtschaftlichkeit.

Das Problem dreht sich also vorerst nicht um die rein technische Frage: Drehstrom-Uebertragung oder Gleichstrom-Uebertragung, sondern — wenn ich so sagen darf — ganz nüchtern nur darum: Wie können wir die Energie auf weite Distanzen so übertragen, dass die Kosten ein Minimum werden? Die Preiserhöhung der kWh durch die Transportkosten entscheidet dann schlussendlich über die Wahl des technischen Systems, das wir für diese Transportfrage annehmen; das ist die allererste Frage, die unsere Tagung beantworten soll.

Die ersten ausgeführten elektrischen Uebertragungen wurden mit Gleichstrom gemacht; wegen der Nachteile der schlechten Verteilung sind sie verschwunden. Dann folgte vor nun genau 50 Jahren die erste Drehstromübertragung von Lauffen nach Frankfurt, und dieser klassische Versuch, der nicht zuletzt — ich darf das hier sicher betonen — durch schweizerischen Unternehmergeist verwirklicht wurde[1]), brachte die heute überall angewandte Drehstromübertragung und auch die Drehstromverteilung. Die Vorteile dieses Systems sind so gross, dass sie immer bleiben werden. Es ist ganz gleichgültig, was für ein Grosskraftübertragungssystem übergeordnet wird; die lokale Verteilung im Lande wird immer Drehstrom bleiben. Mit Drehstrom werden heute schon Energiemengen von einigen hunderttausend kW auf mehrere hundert km gut und sicher übertragen, auch wirtschaftlich. Das heutige Thema soll aber zeigen, ob dies auf sehr grosse Distanzen und für äusserst grosse Leistungen auch noch möglich ist.

Viele entscheidende technische Fragen sind daher abzuklären, einmal: wo liegen die Grenzen der statischen und dynamischen Stabilität bei voller Sicherheit? Dann müssen wir festlegen: was für Mittel haben wir, um beliebig weit Energie mit voller Stabilitätssicherheit zu übertragen, und was kosten die Mittel für diese Stabilisierungssicherung? Je grösser die Uebertragungsdistanzen und damit die Uebertragungsleitungen werden, um so höher müssen die Uebertragungsspannungen gewählt werden.

Die Leitungskosten sind einerseits bedingt durch die Schwere des Leiters, und dadurch wird bedingt die Schwere der Masten, und dann schlussendlich — aber weniger ausschlaggebend — durch die Isolation. Diese Bedingungen hängen nicht zuletzt auch noch davon ab, ob das Uebertragungssystem, wenn es mit Drehstrom gemacht wird, eine Nullpunkterdung bekommt oder ob die Erdung über Löschspulen erfolgt. Dieses Erdungssystem, das ja für die heutigen Verhältnisse klar gelöst ist und jedenfalls in Europa immer über Löschspulen gemacht wird, müssen wir für Höchstleistungsübertragungen auf sehr grosse Distanzen noch einmal frisch untersuchen; denn die Rückwirkungen auf die Kosten der Leitungen sind hier ausgesprochen gross, auch die Kosten für die Transformatoren und für viele Schutzmassnahmen wegen der Erdung. Gerade im ersten Vortrag, den Sie heute hören werden, werden alle diese grundsätzlichen Fragen angeschnitten; sie sollten eigentlich durch den Vortrag auch beantwortet werden.

Wie Sie alle wissen, erfordert die Drehstromübertragung auf grosse Distanzen besondere Massnahmen zur Aufrechterhaltung der Stabilität. Diese Mittel — es ist vorläufig gleichgültig, welcher Art sie sind — kosten Geld. Dann müssen die Leiter der Drehstromübertragung meistens — oder immer — aus verschiedenen Gründen im Durchmesser ziemlich gross gewählt werden (Skin-Effekt, Koronaverluste), und das bedingt relativ kostspielige Leitungen. Demgegenüber kennt die Gleichstromübertragung kein Stabilitätsproblem; infolgedessen fallen schon hier beträchtliche Kosten weg. Die Gleichstromübertragung hat nur zwei statt drei Leiter; damit tritt die Erfahrung in Erscheinung, dass zwei Leiter betriebssicherer sind als drei. Sodann kann man bei der Gleichstromübertragung bei richtiger Wahl der Spannungsverhältnisse vielleicht massive Leiter verwenden; dadurch wird die Leitung leichter und werden die Masten leichter. Alle diese Punkte bringen es nun mit sich, dass man heute auch davon spricht, die Höchstleistungskupplungsstrecken eventuell mit Gleichstrom zu machen.

Wie ich bereits eingangs betont habe, ist der ganze Fragenkomplex in erster Linie ein reines Kostenproblem; wenn es sich zeigt, dass man die Uebertragung mit Gleichstrom viel billiger machen kann als mit Drehstrom, dann sind wir Techniker eben dazu da, die technische Seite des Problems zu lösen.

Sicher wird sein, dass die Energieerzeugung immer in Drehstrom gemacht wird, und zwar vermutlich mit Synchronmaschinen von normaler Frequenz. Es wäre aber nicht ausgeschlossen, dass man auch hier einmal den Gedanken, den Leblanc ausgesprochen hat, verwirklichen könnte, nämlich dass man Asynchronmaschinen von sehr hoher Frequenz als Generatoren verwendet, das heisst, man könnte die Turbinen in ihrer Geschwindigkeit vollständig an die hydraulischen Verhältnisse anpassen.

Die Umformung von Drehstrom am Erzeugerort auf Gleichstrom wird bestimmt nicht mehr durch rotierende Maschinen erfolgen; denn heute besitzen wir genügend Apparate, um das auf statische Weise machen zu können. Für die Umformung von Gleichstrom auf Drehstrom am Empfangsort werden die gleichen statischen Apparate benützt werden. Die Apparate, die wir da verwenden können, kennen Sie alle; es sind die Apparate, die mit flüssiger Kathode in Anwesenheit von Metalldämpfen arbeiten. Darüber brauchen wir nicht viele Worte zu verlieren; auch die Steuerung dieser Apparate kennen wir fast alle. Hingegen sollte heute etwas über den Stand der heutigen Entwicklung dieser Apparate gesprochen und dann vor allen Dingen

[1]) Bulletin SEV 1941, Nr. 18, S. 425.

Der heutigen Nummer liegt ein Prospekt über das «Handbuch für Beleuchtung bei.

die Bedeutung der Schaltungen der zugehörigen Transformatoren eingehender behandelt werden. Die Phasenzahl, der Oberwellengehalt im Drehstromnetz und die Rückwirkung auf die Generatoren sind ebenfalls besonders klarzustellen.

Ganz gleich wie bei der Drehstromübertragung ist auch bei der Gleichstromübertragung zu untersuchen, ob das Netz mit geerdetem Systempunkt ausgeführt werden soll — ich glaube, das isolierte Gleichstromnetz wird wahrscheinlich niemand befürworten. Dann ist vor allen Dingen auch zu untersuchen, ob das Gleichstromnetz als Einleiter-Netz mit Rückleitung durch die Erde erstellt werden kann; dabei sind alle Konsequenzen dieses Systems mit zu beachten: Erdung, Störungsmöglichkeit, Korrosion, Signalstörung usw. Darüber hoffen wir auch etwas Näheres zu erfahren. Dann kommt dazu: Soll das System dieser Gleichstromübertragung als Konstantstrom-System oder als Konstantspannungs-System gemacht werden? Das ist eine Frage von ausschlaggebender Bedeutung, über die man sich unter Umständen sehr lange unterhalten kann; ich hoffe, wir kommen damit doch zu Ende. Alle diese wichtigen Fragen sollen neben dem Netzschutz und der Blindleistungskompensation im zweiten Vortrag: «Problem der Gleichstromenergieübertragung bei sehr grossen Leistungen und Distanzen» ihre Beantwortung finden.

Dann habe ich ja schon genügend angetönt, dass den Kosten für die Erstellung der Leitung eine ganz ausserordentliche Bedeutung zukommt; das trifft zu sowohl für die Freileitung als auch für die Kabelverbindung. Ich nehme an, dass die beiden Referate über Freileitung und Kabel hier alle Punkte behandeln werden, die nötig sind. Beim Kabel wäre es sehr interessant, etwas Näheres zu vernehmen darüber, ob Kabel mit Oelfüllung oder Massekabel, Kabel unter Druck usw. mit Vorteil angewandt werden. Bei den Freileitungen wäre es interessant, etwas zu hören über die Bauart der Leitung selbst und über die Wahl der Maste — es gibt alle möglichen Formen, die man da anwenden kann. Ich hoffe also, dass uns auch über diese Punkte durch die beiden Referate über die Freileitung und die Kabel etwas geboten wird.

Ich glaube damit die Aufgaben der heutigen Tagung klar umrissen und die wesentlichsten Punkte, die beantwortet werden sollen, genügend klar angegeben zu haben. Erst wenn alle die Fragen, die ich angeschnitten habe, beantwortet sind, und zwar technisch und kostenmässig, kann man die am Anfang gestellte Hauptfrage beantworten: welches ist der billigste Weg für den Transport grosser Energien auf grosse Distanzen? Und erst im Anschluss daran kann dann die Frage diskutiert werden, unter welchen Verhältnissen die Gleichstromübertragung gegenüber der Drehstromübertragung Vorteile hat, oder umgekehrt, und wo die Schnittpunkte liegen.

Ich bin überzeugt, dass die wesentlichsten Punkte heute ihre Beantwortung finden werden und hoffe, dass unsere heutige Aussprache manche Anregung geben wird zur weiteren Ueberlegung für die Zukunft.

Damit habe ich diese kurze Einführung geschlossen und möchte gleich Herrn Dr. Wanger das Wort geben zu seinem Vortrag: «Probleme der Drehstromenergieübertragung bei sehr grossen Leistungen und Distanzen».

Probleme der Drehstrom-Energieübertragung bei sehr grossen Leistungen und Distanzen

Vortrag, gehalten an der Diskussionsversammlung des SEV vom 13. Dezember 1941 in Zürich,

von *W. Wanger*, Baden.

621.315.051.025.3

Die Energieübertragung mit Drehstrom stösst bei der Vergrösserung der Uebertragungsdistanz und der übertragenen Leistung hauptsächlich auf zwei Schwierigkeiten. Einerseits zwingen wirtschaftliche Gründe zur Steigerung der Uebertragungsspannung, wodurch die Isolationstechnik vor neuartige und schwierige Aufgaben gestellt wird. Die Frage der Nullpunktserdung muss in diesem Zusammenhang von Grund auf studiert werden, wobei auch Probleme des Netzschutzes abzuklären sind.

Anderseits bereitet die Stabilität des Parallelbetriebes bei sehr langen Leitungen beträchtliche Schwierigkeiten. In diesem Vortrag werden die natürlichen Grenzen der statischen und dynamischen Stabilität aufgezeigt, wobei die Uebertragung der natürlichen Leistung besonders berücksichtigt wird. Sodann wird die Kompensation der Leitung als ein Mittel zur Erweiterung der Stabilitätsgrenzen ausführlich behandelt. Schliesslich wird noch die asynchrone Uebertragung kurz gestreift und auf die Möglichkeit der Verwendung von höhern oder tiefern Frequenzen hingewiesen.

La transmission d'énergie triphasée à des distances de plus en plus grandes et avec des puissances accrues, se heurte principalement à deux sortes de difficultés. D'une part, des raisons d'ordre économique exigent un accroissement de la tension de transmission, ce qui place la technique des isolements devant de nouveaux et ardus problèmes. A cet égard, la question de la mise à la terre du neutre doit être reprise à sa base et les problèmes de la protection des réseaux doivent être également résolus.

D'autre part, la stabilité du service en parallèle présente de notables difficultés quand les lignes sont très longues. L'auteur indique quelles sont les limites naturelles de la stabilité statique et dynamique, tout spécialement pour la transmission de la puissance naturelle. Il s'occupe ensuite en détail de la compensation de la ligne pour étendre les limites de la stabilité, puis aborde succinctement la transmission asynchrone et mentionne la possibilité d'utiliser des fréquences plus élevées ou plus basses.

I. Einleitung.

Nach den einleitenden Worten des Herrn Präsidenten erübrigt es sich, die Bedeutung der Energieübertragung auf grosse Distanzen noch besonders zu unterstreichen. Es ist unbestritten, dass in Zukunft noch viel grössere Leistungen zu übertragen und viel grössere Distanzen zu überbrücken sein werden, als es bisher schon geschehen ist.

Ausser der von Thury ausgeführten Energieübertragung zwischen Moutiers und Lyon, bei der

ca. 20 000 kW bei einer Gleichspannung von 125 kV über 448 km übertragen wurden [1]), sind alle bisherigen Grosskraftübertragungen mit Wechselstrom, vornehmlich mit Dreiphasenstrom, verwirklicht worden. Bei der fortwährenden Steigerung der übertragenen Leistungen und der Distanzen, die der Drehstromübertragung immer wieder neue Schwierigkeiten in den Weg legt, erhebt sich aber die Frage, ob nicht ein anderes Uebertragungssystem die Aufgabe wirtschaftlicher lösen könnte. Der grosse Konkurrent des Drehstroms ist dabei der Gleichstrom.

Wenn nämlich der Gleichstrom — trotz den günstigen Verhältnissen für die Leitung selber — bisher im Nachteil war, weil die Endstationen relativ teuer sind und daher bei Distanzen von wenigen 100 km die Gesamtkosten in die Höhe treiben, so spielen die Kosten der Endstationen eine um so geringere Rolle, je grössere Distanzen zu überbrücken sind. Ausserdem lassen sich im Bereich sehr grosser Distanzen und hoher Spannungen gewisse Probleme bei Gleichstrom leichter und vor allem auch wirtschaftlicher lösen als bei Drehstrom. Es sei nur an die Stabilität des Parallelbetriebes und an die Stromverdrängung und die Koronaverluste der Leitungen erinnert. Die Aussichten für die Gleichstromübertragung sind daher um so günstiger, je grösser die Distanzen und die Spannungen sind.

Als Grundlage für den Vergleich der beiden Uebertragungssysteme soll hier zunächst die Drehstromübertragung behandelt werden. Die Materie ist aber derart umfangreich, dass es vollständig ausgeschlossen ist, in der zur Verfügung stehenden Zeit auf alle interessanten Fragen dieses Gebietes einzugehen. Wir müssen uns daher fast ausschliesslich auf die Probleme beschränken, die neu auftauchen, wenn man noch grössere Leistungen als bisher über noch grössere Entfernungen überträgt.

Nun bereitet die Steigerung der Leistung an sich keine Schwierigkeiten; sie könnte ja im Prinzip durch Parallelschaltung von Leitungen, Transformatoren und Maschinen bewältigt werden. Die Zusammenfassung von parallel geschalteten Einheiten zu solchen grösserer Leistung, sofern dadurch wirtschaftliche Vorteile erreicht werden, ist eine Entwicklung, die von der Technik ohnehin angestrebt wird und mit der Grosskraftübertragung höchstens indirekt zusammenhängt. Dagegen stellt die Steigerung der Leistung die Hochleistungsübertragung dadurch vor neue Probleme, dass sie aus wirtschaftlichen Gründen zur Wahl einer höhern Spannung zwingt.

Es ist vielleicht ganz gut, sich kurz zu überlegen, durch welche Gesichtspunkte die Spannung der Uebertragungsleitung bedingt ist. Eine alte Faustregel, die auch heute noch angewendet wird, besagt, dass die Spannung soviel kV betragen müsse wie die Leitungslänge Meilen. Eine solch einfache Abhängigkeit zwischen der Distanz und der Spannung — ohne Rücksicht auf die Leistung — scheint jedoch nicht richtig. Wenn viele ausgeführte Leitungen jene Regel mehr oder weniger bestätigen, so kommt das wohl zum Teil daher, dass im allgemeinen mit zunehmender Distanz grössere Leistungen übertragen worden sind und aus diesem Grunde eine Erhöhung der Spannung vorteilhaft war.

In einem gewissen Bereich wird zwar tatsächlich die wirtschaftlichste Spannung mit der Uebertragungsdistanz zunehmen; denn bei grösserer Leitungslänge machen die Kosten der zwei Endstationen einen kleinern Anteil an den Gesamtkosten aus, so dass grössere Kosten für diese Endstationen, wie sie sich bei höherer Spannung ergeben, nicht unwirtschaftlich sind, wenn dafür die Kosten der Leitung kleiner werden. Bei Leitungslängen von vielen hundert km ist dagegen die wirtschaftlichste Spannung fast unabhängig von der Leitungslänge, wie Fig. 1 zeigt [2]). Das erklärt sich dadurch, dass

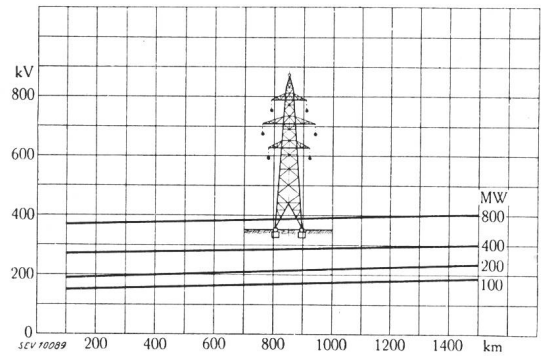

Fig. 1.
Die wirtschaftlichste Spannung einer Drehstromdoppelleitung in Abhängigkeit von der Uebertragungsdistanz und der übertragenen Leistung.

so lange Drehstromleitungen mit verteilten Stützpunktstationen ausgerüstet werden müssen, deren Kosten von der gleichen Grössenordnung sind wie die der Endstationen. Mit zunehmender Uebertragungsdistanz vergrössern sich daher die Kosten aller Stationen fast im gleichen Masse wie die Leitungslänge. Wenn aber die Verteilung der Kosten auf Leitung und Station von der Leitungslänge fast unabhängig ist, so gilt das gleiche für die wirtschaftlichste Spannung. In dem Bereich, der uns hier interessiert, hängt also diese hauptsächlich von der Grösse der übertragenen Leistung ab. Mit wachsender Leistung werden daher auch wachsende Spannungen zu bewältigen sein.

Anderseits bereitet die Vergrösserung der Uebertragungsdistanz bei Wechselstrom wegen der Stabilität des Parallelbetriebes beträchtliche Schwierigkeiten. Es sind also zwei grosse Fragenkomplexe, die bei Steigerung der übertragenen Leistung und Vergrösserung der Leitungslänge behandelt werden müssen: das Isolationsproblem und das Stabilitätsproblem. Wenden wir uns zunächst dem ersten zu.

II. Das Isolationsproblem.

1. Die Isolation des Hochspannungsmaterials.

Was die Isolation der Freileitungen anbelangt, bereitet die Erhöhung der Spannung keine grund-

[1]) Bulletin SEV 1930, Nr. 5, S. 159.

[2]) Die Figur ist den Brown-Boveri-Mitt., Oktober 1941, S. 258, entnommen.

sätzlichen Schwierigkeiten, seit man Hängeisolatoren verwendet, die in beliebiger Zahl zu Isolatorketten zusammengefügt werden können. Ausserdem ist in den letzten Jahren auch die Entwicklung der Langstabisolatoren sehr gefördert worden. Im übrigen braucht man hier nicht auf Einzelheiten einzugehen, da ja der Freileitungsbau in einem besondern Vortrag behandelt wird. Aus diesem Grunde sollen auch die Koronaverluste der Freileitungen nicht zur Sprache kommen.

Beim Stationsmaterial bietet die Isolation der Leistungsschalter, Trenner und dergleichen ebenfalls keine prinzipiellen Schwierigkeiten. Die Isolation gegen Erde wird meistens durch Stützisolatoren verwirklicht, seit die moderne Schalterentwicklung ermöglicht hat, ohne Durchführungen auszukommen. Die Isolation der aktiven Unterbrechungsstellen von Leistungsschaltern ist schon heikler, steht aber der Weiterentwicklung in Richtung höherer Spannungen auch nicht im Wege. Eine gute Lösung ist der Druckluftschalter mit Vielfachunterbrechung. Durch Steuerung der Spannungsverteilung lässt sich eine eindeutige Aufteilung der totalen Spannung auf die einzelnen Unterbrechungsstellen erzielen, so dass man es dann nur noch mit viel kleinern Spannungen zu tun hat, die man sehr gut beherrscht. Das hat ausserdem noch den Vorteil, dass man die einzelnen Elemente im Versuchslokal mit ihrer vollen Abschaltleistung prüfen kann, was für einen kompletten Höchstspannungsschalter absolut ausgeschlossen ist. Natürlich lässt sich das Problem der Abschaltung sehr grosser Leistungen bei höchsten Spannungen auch auf andere Art lösen, z. B. mit ölarmen Schaltern.

Was die Messwandler anbelangt, hat man kürzlich versucht, die Spannungswandler überhaupt überflüssig zu machen, indem man geeignete Messwicklungen in den Leistungstransformatoren anbringt. Das ist bei den höchsten Spannungen ganz besonders interessant. Im übrigen hat man sich für die Isolation der Messwandler die Fortschritte im Transformatorenbau zunutze gemacht, so dass wir uns ersparen können, hier auf weitere Einzelheiten einzugehen.

Damit sind wir beim schwierigsten Isolationsproblem, demjenigen der Transformatoren, angelangt. Tatsächlich beeinflusst die Höhe der Spannung die Abmessungen und den Materialaufwand der Transformatoren ganz gewaltig. Da kommen uns nun die grossen Fortschritte der letzten Jahre zu gut. Sie wurden einerseits dadurch erreicht, dass man das elektrische Feld des Transformators ganz genau studiert und die nötigen Konsequenzen für den Aufbau der Isolation daraus gezogen hat, anderseits dadurch, dass man für die Isolation gegen Erde ölgetränkte Papierwickel verwendet hat, wie das in der Kabelfabrikation schon lange gemacht wurde. Nur das Randproblem, das beim Kabel durch den Endverschluss gelöst wird, ist beim Transformator sehr schwierig, weil der verfügbare Platz äusserst knapp ist. Nachdem aber dafür eine günstige Lösung gefunden worden war, liessen sich die gleichen Transformatorleistungen auf ausserordentlich viel kleinerm Raum unterbringen und mit sehr viel geringerem Materialaufwand verwirklichen als früher, und die Beherrschung von noch höhern Spannungen als bisher ist dadurch überhaupt erst möglich geworden.

Es ist nämlich zu berücksichtigen, dass man seit einiger Zeit immer mehr dazu übergegangen ist, komplett bahntransportfähige Transformatoren zu bauen. Bei den grossen Vorteilen, die diese Bauart bietet, wird man sicher auch in Zukunft, wenn immer möglich, daran festhalten. Daher sind die Abmessungen der Transformatoren durch das Bahnprofil ausserordentlich eingeschränkt und auch ihr Gewicht darf nicht beliebig gross sein.

Je höher die Spannung, um so kleiner wird unter sonst gleichen Umständen die Leistung, die in einem bahntransportfähigen Transformator untergebracht werden kann. Die Spannungsgrenze, bei der eine bestimmte, wirtschaftlich vernünftige Leistung (sagen wir mindestens 100 MVA) gerade noch möglich ist, ist durch die erwähnten Isolationsverbesserungen wesentlich heraufgesetzt worden. Ein weiterer Fortschritt lässt sich noch erzielen, indem man für den Eisenkörper einen Aufbau wählt, der eine geringere Jochhöhe ermöglicht als der übliche Kerntyp mit 3 Säulen, so dass für die Wicklungshöhe mehr Platz bleibt. Diese Möglichkeit bietet der fünfschenklige Eisenkörper und insbesondere der Eisenkörper mit radial geblechten Säulen, bei dem das Joch horizontal geblecht wird und daher wesentlich breiter ausgeführt werden kann als der Kern.

Aber alle diese Verbesserungen genügen noch nicht, um die verlangte Leistung bei 400 kV oder mehr im Bahnprofil unterzubringen, sofern man die Wicklung durchgehend für die doppelte Betriebsspannung isolieren will, wie das bis heute bei Netzen mit nicht direkt geerdetem Nullpunkt üblich war. Bevor wir uns der wichtigen Frage der Nullpunktserdung zuwenden, wollen wir untersuchen, was sich isolationstechnisch noch erreichen lässt, wenn man von einer direkten Erdung absieht und bei der Verwendung von Löschspulen bleibt.

Da beim Erdschluss einer Phase nur die *Enden* der beiden andern Phasen volle verkettete Spannung gegen Erde aufweisen, der Sternpunkt dagegen bloss Phasenspannung, so genügt eine abgestufte Isolation des Transformators, bei der die Wicklungsenden die volle Prüfspannung (= doppelte verkettete Betriebsspannung) aushalten, der Sternpunkt aber nur einen $\sqrt{3}$ mal kleinern Wert. Allerdings muss dann dafür gesorgt werden, dass auch die Stoßspannungen am Sternpunkt mindestens $\sqrt{3}$ mal kleiner bleiben als an den Klemmen. Ohne besondere Massnahmen ist nämlich bei einer dreipolig auflaufenden Stosswelle die Spannung am Sternpunkt nicht nur gleich gross, sondern sogar grösser als an den Klemmen. Man muss daher zwischen Sternpunkt und Erde einen Ueberspannungsableiter anschliessen oder eine besondere Schaltung vorsehen, die die Stoßspannungen am Sternpunkt verkleinert [3]).

[3]) Siehe Brown-Boveri-Mitt., Juni 1941, S. 150.

Bei dieser Gelegenheit sei noch bemerkt, dass selbstverständlich auch die Windungsisolation den im Betrieb vorkommenden Stoßspannungsbeanspruchungen gewachsen sein muss. Die intensiven Forschungsarbeiten der letzten Jahre haben dazu geführt, dass man die Stoßspannungsverteilung in Transformatoren vorausberechnen und durch verschiedene Massnahmen günstig beeinflussen kann. Auch dieses Problem darf daher als gelöst gelten.

Mit einer Abstufung der Isolation gegen Erde, wie sie soeben angegeben wurde, lassen sich nun bei 400 kV noch bahntransportfähige Transformatoren für wesentlich über 100 MVA bauen. Man könnte noch weiter gehen und eine Schaltung vorsehen, die bei Erdschluss betriebsfrequente Spannungen in den Transformatorwicklungen derart induziert, dass der Spannungsstern unsymmetrisch wird und der Sternpunkt auf weniger als Phasenspannung gegenüber Erde gehoben wird. Wenn man aber die Sternpunktsspannung merklich reduzieren will, so erhalten die gesunden Phasen eine entsprechend höhere Spannung und ihre Eisenkerne müssen einen wesentlich vergrösserten Fluss führen. Die Vorteile bei der Isolation werden also durch entsprechende Nachteile beim Eisengestell erkauft, weshalb diese Methode nicht sehr interessant scheint. Die Spannungen im Netz draussen werden durch sie überhaupt nicht beeinflusst. Denn wenn man den Erdschlußstrom auf Werte begrenzen will, bei denen ein Erdschlusslichtbogen von selber erlischt — das ist ja der Zweck der Löschspule — so kann man nicht verhindern, dass die Phase mit Erdschluss auf Erdpotential und die beiden andern Phasen auf verkettete Spannung kommen.

Damit sind wir glücklich wieder bei der Frage der Nullpunktserdung angelangt. Die grossen Vorteile der Löschspule sind ja bekannt. In Mitteleuropa ist die überwiegende Anzahl Netze mit Löschspulen ausgerüstet, und auch in andern Ländern, wo früher ausschliesslich die starre Nullpunktserdung angewendet wurde, hat die Löschspule im Laufe der Zeit an Boden gewonnen. Man darf also wohl heute — wenigstens in Europa — die Anwendung der Löschspule als die Normallösung bezeichnen. Das will nun aber selbstverständlich nicht heissen, dass es so bleiben muss, wenn man zu immer höhern Spannungen übergeht.

Zunächst würde der Uebergang zur direkten Nullpunktserdung das Isolationsproblem der Transformatoren — über das bereits Angeführte hinaus — noch wesentlich erleichtern und vor allem die Spannungsgrenze, bei der eine bestimmte Leistung im Bahnprofil untergebracht werden kann, nochmals merklich heraufsetzen. Dieses Argument der direkten Erdung kann einmal eine Rolle spielen, scheint aber heute noch nicht ausschlaggebend zu sein.

Man wird sich daher zunächst einmal überlegen, ob die Nachteile der direkten Erdung tragbar sind, um sich damit ihre unzweifelhaften Vorteile zu erkaufen. Die Nachteile bestehen hauptsächlich darin, dass jeder einpolige Erdschluss ein Kurzschluss ist. Die gestellte Frage kann daher nicht beantwortet werden, ohne dass man sich über die wesentlichsten Punkte des Kurzschlußschutzes Rechenschaft gibt.

2. Fragen des Netzschutzes.

Seit langem hat man angestrebt, den Netzschutz so zu gestalten, dass jeder Kurzschluss selektiv und sehr rasch abgeschaltet wird. Dadurch werden einerseits alle schädlichen Auswirkungen des Kurzschlußstromes auf ein Minimum reduziert, anderseits ist es die beste Methode zur Erhaltung der Stabilität des Parallelbetriebes. Heute kann das Problem als gelöst betrachtet werden, denn totale Kurzschlussdauern von etwa 0,1 s, die jetzt erreicht werden, dürften allen Anforderungen genügen. Bei gleichmässiger Aufteilung dieser Zeit stehen für die Relais und für die Schalter je ca. 0,05 s zur Verfügung. Sowohl beim Distanzschutz als auch beim Streckenschutz (Differentialschutz) lässt sich die Selektion in dieser Zeit durchführen. Auch Schalter mit einer totalen Ausschaltzeit (inkl. Lichtbogendauer) von 0,05 s sind heute erhältlich. Dabei ist natürlich ein System vorteilhaft, bei dem die beweglichen Kontakte einen sehr kurzen Oeffnungsweg haben, weil dann die ausserordentlich kurzen Zeiten ohne übermässig grossen Kraftaufwand erreicht werden können. Sowohl bei den Relais als auch bei den Schaltern werden sich die angegebenen Zeiten auch noch für wesentlich höhere Spannungen einhalten lassen.

Eine sehr kurze Abschaltzeit genügt aber noch nicht, um die bei direkter Nullpunktserdung viel häufigeren Kurzschlüsse in Kauf nehmen zu können. Nach der Abschaltung des Kurzschlusses muss die unterbrochene Leitung möglichst rasch wieder zugeschaltet werden. Bei mittleren Hochspannungen ist ein Lichtbogen in 1 bis 2 Zehntel Sekunden entionisiert, so dass nach dieser Zeit wieder eingeschaltet werden kann. Die totale Störungszeit, bestehend aus Kurzschluss- und Unterbrechungsdauer, beträgt dann 2 bis 3 Zehntel Sekunden und ist kurz genug, um die Stabilität des Parallelbetriebes in den meisten Fällen zu gewährleisten.

Es ist nun allerdings denkbar, dass bei sehr hohen Spannungen längere Unterbrechungszeiten nötig sind, um die Entionisierung der Lichtbögen zu ermöglichen. Man ist daher noch nicht ganz im klaren, ob die Methode der raschen Wiedereinschaltung auch bei den höchsten Spannungen die Stabilität des Parallelbetriebes in allen Fällen sichern kann. Die Nachteile der direkten Nullpunktserdung sind also noch nicht vollständig überwunden, wenn sie auch nicht so schwerwiegend sind, wie es auf den ersten Blick scheinen möchte.

Der Vollständigkeit halber seien noch die Röhrenableiter erwähnt, die parallel zu den Freileitungsisolatoren angeordnet werden und die Aufgabe haben, Erdkurzschlüsse direkt an ihrem Entstehungsort zu unterbrechen. Aber auch mit Röhrenableitern scheinen keine Erfahrungen bei ganz hohen Spannungen vorzuliegen.

Selbstverständlich stellen die rasche Wiedereinschaltung oder die Röhrenableiter nicht einfach einen Ersatz für die Löschspule dar. Insbesondere

die Wiedereinschaltung leistet in einer Beziehung wesentlich mehr als die Löschspule: sie schaltet auch alle *mehrpoligen* Lichtbogenkurzschlüsse ohne Betriebsunterbrechung ab. Anderseits hat aber die Löschspule den grossen Vorteil, dass sie bei einem einpoligen Erdschluss überhaupt keinen Kurzschluss entstehen lässt. Man wird also auch bei Anwendung der raschen Wiedereinschaltung oder von Röhrenableitern nur dann auf die technischen Vorteile der Löschspule und die zusätzliche Sicherheit, die sie bietet, verzichten, wenn die direkte Nullpunktserdung wesentliche wirtschaftliche Vorteile bietet.

3. *Wirtschaftliche Vorteile der direkten Nullpunktserdung.*

Der grösste Nachteil der Löschspule bei Höchstspannung besteht wohl darin, dass sie unter Umständen dazu zwingt, grössere Durchmesser der Freileitungen anzuwenden. Bei direkt geerdetem Nullpunkt genügt es, den Leiterdurchmesser so gross zu wählen, dass bei symmetrischer Spannungsverteilung (d. h. Phasenspannung zwischen Leiter und Erde) keine wesentlichen Koronaverluste auftreten. Diese minimale Leiterdimensionierung kann aber in einem gelöschten Netz bei Erdschluss einer Phase so grosse Koronaverluste ergeben, dass die Spannung überhaupt zusammenbricht. Um das zu verhindern und den durch die Koronaverluste verursachten Erdschlussreststrom so klein zu halten, dass er durch die Spule gelöscht wird, ist eine Vergrösserung des Leiterdurchmessers erforderlich.

Wie durchgerechnete Beispiele [4]) zeigen, ist die nötige Vergrösserung unter Umständen beträchtlich; es kann sich um Werte von 30...40 % handeln. Da die Hohlseile aus mechanischen Gründen eine gewisse Mindestwandstärke aufweisen müssen, bedingt eine solche Vergrösserung des Durchmessers eine gehörige Erhöhung des Leitergewichtes und eine entsprechende Verstärkung der Masten, so dass die Gesamtkosten der Uebertragungsanlage beträchtlich erhöht werden [5]). In einem solchen Fall ist natürlich die Verwendung von Löschspulen ausgeschlossen, sofern eine andere Möglichkeit besteht, Lichtbogenerdschlüsse ohne Betriebsunterbrechung rasch abschalten zu können. Die Löschspule kann sich höchstens deswegen behaupten, weil über die Methode der raschen Wiedereinschaltung bei Höchstspannung noch keine Betriebserfahrungen vorliegen.

Abgesehen von einigen weniger wichtigen Punkten [6]), die hier nicht behandelt werden sollen, bestehen die weitern Nachteile der Löschspule hauptsächlich darin, dass in einem gelöschten Netz höhere betriebsfrequente Spannungen und betriebsbedingte Ueberspannungen vorkommen als in einem direkt geerdeten Netz, so dass unter Umständen eine höhere Isolation der Anlage erforderlich ist. Es sei aber betont, dass es sich im allgemeinen nicht um ein Verhältnis der Spannungen von $1 : \sqrt{3}$ handelt, sondern nur von 1 : 1,3 bis 1 : 1,4. Untersuchen wir zunächst die Verhältnisse für die Isolation des Stationsmaterials.

In modernen Anlagen wird man normalerweise Ueberspannungsableiter verwenden, da heute solche für praktisch beliebig grosse Ableitströme erhältlich sind und auch ihre Weiterentwicklung für beliebig hohe Spannungen keine grundsätzlichen Schwierigkeiten bietet. Der Ueberspannungsableiter macht alle atmosphärischen Ueberspannungen unschädlich, so dass die Anlageisolation nur die andern Arten der Ueberspannungen aushalten muss, die im direkt geerdeten Netz niedriger sind als im Netz mit Löschspule. Also kann im ersten Fall auch die Isolation kleiner gehalten werden. Dadurch wird gewisses Stationsmaterial etwas billiger. Aber wenn sich z. B. an den Transformatoren sogar 10...15 % einsparen lassen, so macht das auf die Totalkosten der Uebertragungsanlage recht wenig aus. Auch die Kosten der Löschspulen selber betragen nur einen minimen Anteil der Totalkosten (Grössenordnung 1 %).

Etwas wichtiger scheint die Isolationsersparnis, die auf den Freileitungen erzielt werden kann, wenn man auf Löschspulen verzichtet. Doch darf auch dieser Punkt nicht überschätzt werden, da die Kosten der Isolatoren nur einen kleinen Bruchteil der Leitungskosten ausmachen. Im übrigen liegen die Verhältnisse für die Freileitungsisolatoren etwas anders als für die Stationsisolation; denn bei der Wahl der Leitungsisolation muss man auch auf die atmosphärischen Ueberspannungen Rücksicht nehmen, so dass trotz kleinerer betriebsbedingter Ueberspannungen nicht ohne weiteres eine schwächere Isolation zulässig ist. Man behauptet nun häufig, bei Höchstspannungsanlagen genüge eine Isolation entsprechend den betriebsbedingten Ueberspannungen, um auch gegen atmosphärische geschützt zu sein. Es ist sicher, dass diese Argumentation um so besser stimmt, je höher die Betriebsspannung ist; aber die Blitz-Ströme und -Spannungen sind doch so gross, dass sie selbst in 300- und 400-kV-Anlagen noch zu Ueberschlägen führen können, wenn die Isolation nur mit Rücksicht auf die betriebsbedingten Ueberspannungen gewählt wird.

Im übrigen wird die Frage der Isolation von Höchstspannungsleitungen meines Erachtens nicht am grünen Tisch gelöst, sondern darüber wird die Betriebserfahrung entscheiden. Genau dasselbe gilt für die Frage der Erdseile. Sicher bieten diese einen wertvollen Schutz gegen atmosphärische Ueberspannungen, aber bei sehr hoher Leitungsisolation und bei Anwendung der raschen Wiedereinschaltung ist es denkbar, dass man darauf verzichten kann.

4. *Diverse Fragen.*

Der Vollständigkeit halber muss noch die Frage der Störung von Schwachstromleitungen angeschnitten werden. Es steht fest, dass eine Hochspannungsleitung mit direkt geerdetem Nullpunkt während der Dauer eines Erdschlusses einen grössern Stör-

[4]) Brown-Boveri-Mitt., Okt. 1941, S. 294.
[5]) Im zitierten Beispiel in der Grössenordnung von 10 %.
[6]) Vgl. Fussnote 4.

einfluss ausübt als eine entsprechende Leitung mit Löschspule. Diese Tatsache verliert aber um so mehr an Bedeutung, je kürzer die Erdschlussdauer ist (moderner Selektivschutz!) und je mehr man allgemein zur Verkabelung der Schwachstromleitungen übergeht. *Freileitungen* für Schwachstrom dürfen natürlich nicht in zu kleinem Abstand parallel zu Höchstspannungsleitungen geführt werden. Im weitern lässt sich bei fester Nullpunktserdung der Störeinfluss dadurch bedeutend verkleinern, dass man den Nullpunkt nur an einem Leitungsende erdet, am andern Ende dagegen isoliert lässt. Allerdings wird die Beanspruchung der Transformatorisolation auf der nicht geerdeten Seite grösser, so dass man dieses Mittel auf der Starkstromseite lieber nicht anwendet.

Im Zusammenhang mit den Schwachstrom-*Störungen* sei auch noch auf die Verwendung des Schwachstromes im Dienste des Netzbetriebes hingewiesen. Die Fernwirkanlagen — dazu gehören Fernmessung, Fernregelung, Fernsteuerung, Fernmeldung und auch die Sprachübermittlung im Netzbetrieb — haben heute einen recht hohen Stand der Entwicklung erreicht; das gilt sowohl für die Apparaturen selber als auch für die Uebertragung mit hochfrequenten Trägerwellen, sei es mit Langwellen längs der Hochspannungsleitung oder mit einer gerichteten Kurzwellenstrahlung ohne Benützung der Leitung. Bei weiterer Steigerung der Uebertragungsspannung werden sich kaum wesentlich neue Probleme zeigen, so dass wir nicht länger auf diesem Gebiet zu verweilen brauchen.

III. Das Stabilitätsproblem.

1. Die physikalischen Vorgänge auf einer langen Leitung.

Bei der Ausdehnung der Drehstromübertragung auf immer grössere Entfernungen gibt uns hauptsächlich das Stabilitätsproblem zu schaffen. Bevor wir seine Behandlung in Angriff nehmen, sollen ein paar Grundbegriffe der Energieübertragung über sehr lange Leitungen in Erinnerung gerufen werden.

Wenn wir zunächst von den Verlusten auf der Leitung absehen, so verhält sich diese wie ein Gebilde von Serie-Induktivitäten und Parallelkapazitäten (vgl. Fig. 2a und b). Beim Leerlauf der Leitung ($I_2 = 0$) stellt sich eine Spannungsverteilung ein, die in Fig. 2c dargestellt ist. Die Spannungen sind an verschiedenen Stellen der Leitung verschieden gross, aber unter sich genau in Phase (vgl. die ausgezogenen Vektoren in der rechten Hälfte der Fig. 2c). An gewissen Stellen gibt es Spannungsknoten, an andern Spannungsbäuche. Wir haben es mit einer sog. stehenden Schwingung zu tun, ähnlich wie man sie mit einem schwingenden Seil, das am Ende festgehalten wird, darstellen kann.

Der Strom ist nur am Ende der Leitung null. Da die Querkapazitäten Strom aufnehmen, muss auch längs der Leitung ein solcher fliessen. Wie Fig. 2c links zeigt, sind Strom und Spannung örtlich um 90° phasenverschoben: Stromknoten fallen mit Spannungsbäuchen zusammen und umgekehrt. Aber auch zeitlich ist der Strom an jeder Stelle um 90° gegenüber der Spannung verschoben, wie in der Fig. 2c rechts dargestellt ist; es handelt sich also an jeder Stelle der Leitung um einen reinen Blindstrom.

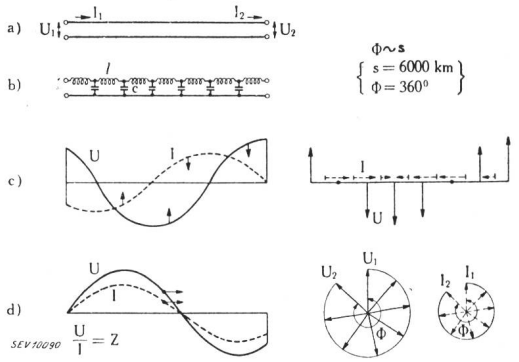

Fig. 2.
Die physikalischen Vorgänge auf einer verlustlosen langen Leitung.

a) Die Leitung.
b) Induktivitäts- und Kapazitätsschema der Leitung.
c) Ströme und Spannungen der leerlaufenden Leitung.
links: schematische Darstellung der stehenden Wellen;
rechts: vektorielle Darstellung.
d) Ströme und Spannungen bei Uebertragung der natürlichen Leistung.
links: die fortschreitenden Wellen;
rechts: die Vektordiagramme.

Die Vorgänge sind bedeutend komplizierter als bei einer kurzen Leitung, die sich im wesentlichen wie eine gewöhnliche Reaktanz verhält. Sie sind aber in einem wichtigen Punkt für lange und kurze Leitungen gleich, nämlich darin, dass die Spannungen am Anfang und Ende in Phase sind, solange keine Leistung übertragen wird. Will man über eine gewöhnliche (d. h. relativ kurze) Leitung Wirkleistungen übertragen, so ist bekanntlich eine Phasenverschiebung zwischen den Spannungen am Anfang und Ende der Leitung erforderlich, und das gleiche gilt nun auch für eine lange Leitung.

Im allgemeinen Fall der Leistungsübertragung sind daher die Verhältnisse sehr unübersichtlich: Ströme und Spannungen ändern längs der Leitung ihre Grösse und ausserdem noch ihre Phase. In einem Spezialfall dagegen sind die Vorgänge bedeutend einfacher, nämlich dann, wenn die Spannungen am Anfang und Ende der Leitung gleich gross eingestellt werden und der Quotient aus der Spannung und dem übertragenen Strom gleich dem Wellenwiderstand der Leitung ist. Man nennt die dabei übertragene Leistung die natürliche Leistung der Leitung; ihr Wert hängt nur von der Höhe der Spannung und dem Wellenwiderstand der Leitung ab.

Bei diesem Betriebszustand haben wir es nicht mehr mit einer stehenden Welle (mit einer Schwingung an Ort) zu tun, sondern mit einer rein fortschreitenden (vgl. Fig. 2d links). Während bei der leerlaufenden Leitung die Kurven der Strom- und Spannungsverteilung gleichsam an der Leitung haften bleiben und fortwährend ihre Höhe ändern, bewegen sich diese Kurven bei der Uebertragung der natürlichen Leistung vom Anfang gegen das Ende der Leitung und behalten dabei Form und Höhe

unverändert bei. Der Effektivwert sowohl der Spannung als auch des Stromes bleibt in diesem Fall längs der ganzen Leitung konstant; es ändert sich nur die Phasenlage, wie am besten aus den Vektordiagrammen rechts in Fig. 2d ersichtlich ist.

Die Phasenverschiebung Φ zwischen Anfang und Ende der Leitung ist bei Uebertragung der natürlichen Leistung für Spannung und Strom gleich gross; sie ist der Leitungslänge und der Frequenz proportional. Bei der Normalfrequenz 50 Hz ergibt sich bei einer Leitunglänge von 6000 km ein Wert $\Phi = 360^0$, bei 3000 km $\Phi = 180^0$ usw. Wenn einmal die Frequenz festliegt, ist Φ direkt ein Mass für die Leitungslänge.

Bei der Uebertragung der natürlichen Leistung ist an jeder Stelle der Leitung der Strom mit der Spannung in Phase, es tritt also nirgends Blindleistung auf. Energetisch ist das so zu verstehen, dass in jedem Leitungsabschnitt die Querkapazitäten gerade soviel Blindleistung erzeugen, wie die Längsinduktivitäten verbrauchen, so dass nach aussen keine Blindleistung in Erscheinung tritt. Das ist aber nur gerade bei der Uebertragung der natürlichen Leistung der Fall.

Dieser Betriebszustand bietet daher ganz besondere Vorteile. Einerseits sind die ohmschen Verluste der Leitung minimal, weil kein Blindstrom übertragen wird; anderseits ergibt sich die beste Ausnützung der Isolation, weil die Spannung längs der ganzen Leitung konstant ist.

Bei einer Leitung mit Verlusten ist es natürlich nicht möglich, dass Ströme und Spannungen längs der Leitung genau konstant sind und nirgends

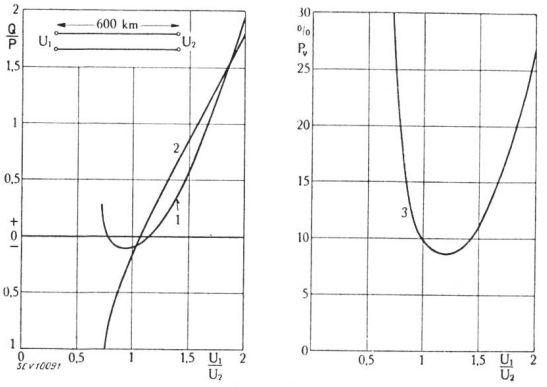

Fig. 3.

Blindleistung Q und Verluste P_v einer Leitung von 600 km Länge und 300 mm² Leiterquerschnitt, bei Uebertragung einer Leistung, die gleich der natürlichen Leistung der Leitung ist.

Kurve *1*: Die am Anfang in die Leitung hineingelieferte induktive Blindleistung, im Verhältnis zu der übertragenen, am Ende abgegebenen Wirkleistung.

Kurve *2*: Die am Ende von der Leitung abgegebene induktive Blindleistung, im Verhältnis zur abgegebenen Wirkleistung.

Kurve *3*: Die ohmschen Verluste der Leitung, in % der abgegebenen Wirkleistung.

Bemerkung: Die aufgetragenen relativen Werte sind von der absoluten Höhe der Spannung unabhängig.

Blindleistungen auftreten. Die Leitungsverluste müssen sich irgendwie in Spannungsabfällen oder Stromänderungen äussern. Am besten erhält man an einem konkreten Beispiel Einblick in diese Verhältnisse. In Fig. 3 sind einige Berechnungen für eine 600 km lange Leitung mit 300 mm² nützlichem Querschnitt aufgetragen.

Die übertragene Wirkleistung ist gleich der natürlichen Leistung gewählt; dabei wird die Spannung am Anfang der Leitung (U_1), variiert, während die Spannung am Ende (U_2) konstant gehalten wird [7]). Die Abszisse gibt den Quotienten dieser beiden Spannungen an.

In der linken Hälfte der Figur sind die Blindleistungen im Verhältnis zur übertragenen Wirkleistung aufgetragen, und zwar ist Kurve *1* die am Anfang in die Leitung hinein gelieferte, Kurve *2* die am Ende von der Leitung abgegebene Blindleistung. Sind die Spannungen am Anfang und Ende gleich gross, so wird eine gewisse kapazitive Blindleistung übertragen. Diese ist erforderlich, um die Wirkkomponente des Spannungsabfalls, die infolge der Verluste auftritt, zu kompensieren. Will man die übertragene Blindleistung auf ein Minimum reduzieren, so muss die Spannung am Anfang der Leitung etwa 10 % höher eingestellt werden als am Ende.

Rechts in der Figur sind die ohmschen Verluste aufgetragen, und zwar in % der übertragenen, am Leitungsende abgegebenen Wirkleistung. Das Minimum ergibt sich, wenn die Spannung am Anfang etwa 20 % höher ist als am Ende der Leitung. Solange die Spannungen nicht mehr als etwa ± 20 % von diesem günstigsten Wert abweichen, sind die Verluste nur wenig höher, bei grössern Abweichungen steigen sie aber rapid an. Mit Rücksicht auf die Verluste dürfte also die Spannung am Anfang etwa zwischen 100 und 140 % der Spannung am Ende liegen. Da aber eine Spannungserhöhung von 40 % mit Rücksicht auf die Isolation schon sehr unangenehm ist, so wird der zulässige Bereich etwa auf 100...120 % eingeschränkt.

Fig. 3 zeigt, dass bei einer Leitung mit Verlusten das Minimum der Blindleistung nicht gleichzeitig mit der Spannungsgleichheit am Anfang und Ende der Leitung auftritt und das Minimum der Verluste nochmals zu einem andern Betriebszustand gehört. Die «Uebertragung der natürlichen Leistung» nach der vorhin gegebenen Definition ist also nur bei der verlustlosen Leitung ein eindeutiger Betriebszustand, umfasst dagegen bei der Leitung mit Verlusten einen gewissen Bereich von Betriebszuständen. Beim Betrieb von wirklich langen Leitungen ist man gezwungen, innerhalb dieses Bereiches der «natürlichen Leistung» zu arbeiten; denn sobald man wesentlich davon abweicht, ist die Uebertragung bedeutend unwirtschaftlicher.

[7]) Man kann nämlich eine Wirkleistung übertragen, die gleich der natürlichen Leistung ist, und trotzdem die Spannungen am Anfang und Ende verschieden gross einstellen, wobei zwangsläufig Blindleistung mitübertragen wird. Es soll aber unter «Uebertragung der natürlichen Leistung» stets der Betriebszustand verstanden werden, bei dem der Wert der natürlichen Leistung ohne jede Blindleistung und bei Spannungsgleichheit am Anfang und Ende übertragen wird. Dass diese Bedingungen bei einer Leitung mit Verlusten nicht alle *exakt* eingehalten werden können, werden wir gleich sehen.

2. *Die natürlichen Uebertragungsgrenzen einer Drehstromleitung.*

Wenn man die Stabilität einer Drehstromleitung untersuchen will, muss man gewisse Annahmen treffen. Wir wollen uns der Einfachheit halber auf Synchronmaschinen mit Volltrommelrotoren beschränken und annehmen, dass die zu untersuchende Leitung die Leistung eines Kraftwerkes überträgt und am Ende an ein sehr starkes Netz angeschlossen ist, so dass wir die Spannung am Ende als konstant voraussetzen dürfen (Fig. 4).

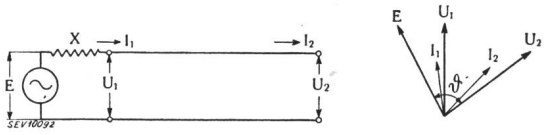

Fig. 4.
Einpoliges Schema und Vektordiagramm für eine Drehstrom-Uebertragung.
Ein Kraftwerk, dargestellt durch *einen* grossen Generator, liefert Energie über eine lange Leitung in ein starkes Netz (U_2).

Bei Stabilitätsuntersuchungen spielt nun die Phasenverschiebung zwischen der innern Spannung E des Generators und der Spannung U_2 am Ende der Uebertragung eine Rolle (Winkel ϑ in Fig. 4); er sei im folgenden kurz Polradwinkel genannt, da er als Voreilwinkel des Generator-Polrades gegenüber der Spannung am Ende der Leitung aufgefasst werden kann. Bei der Uebertragung über eine relativ kurze Leitung beträgt die übertragene Wirkleistung P in Funktion des Polarwinkels bekanntlich

$$P = \frac{E \cdot U_2 \cdot \sin \vartheta}{X} \qquad (1),$$

wo X die Summe der Generatorreaktanz und der Leitungsreaktanz bedeutet. Es ist sehr gebräuchlich, diese Formel auch für *lange* Leitungen zu verwenden und daraus zu schliessen, dass die übertragbare Leistung um so kleiner sei, je länger die Leitung ist. Diese Darstellung findet man noch in allerneuesten Veröffentlichungen, und zwar von Autoren, die auf dem Gebiet der Stabilität und der Energieübertragung einen Namen haben. Es schien mir daher nötig, hier ganz ausdrücklich dagegen Stellung zu nehmen.

Die richtige Formel für die Uebertragung über lange Leitungen lautet nämlich

$$P = \frac{E \cdot U_2 \cdot \sin \vartheta}{X \cos \Phi + Z \sin \Phi} \qquad (2),$$

wo X die Reaktanz des Generators,
Z den Wellenwiderstand der Leitung und
Φ die Länge der Leitung in Winkelmass [8]) bedeutet.

Es ist natürlich ausgeschlossen, die Ableitung dieser Gleichung hier mitzuteilen.

Man sieht sofort, dass die übertragbare Leistung nicht einfach um so kleiner wird, je länger die Leitung, sondern dass die Abhängigkeit von Φ, d. h. von der Leitungslänge viel komplizierter ist. Der Nenner der Gl. (2) ist in Fig. 5a für ein Verhältnis $X : Z = 0{,}3$ in Funktion der «Leitungslänge» Φ aufgetragen. Er nimmt tatsächlich mit wachsender Leitungslänge zunächst zu, die übertragbare Leistung also ab. Nach Ueberschreiten eines Maximums wird aber der Nenner wieder kleiner, die übertragbare Leistung wird also wieder grösser. In der Nähe von $\Phi = 180^0$ und $\Phi = 360^0$ hat der Nenner der Gl. (2) sehr kleine Werte. Die Stabilität ist daher für Leitungen dieser Länge besser als für viel kürzere Leitungen. Diese Tatsache ist dem Einfluss der Leitungskapazität zu verdanken, die bei den genannten Leitungslängen mit der Leitungsinduktivität in eine Art Resonanz kommt und sie gleichsam kompensiert. Es ist daher keineswegs zulässig, bei den Stabilitätsuntersuchungen immer nur von der Induktivität zu reden und die Kapazität zu vernachlässigen.

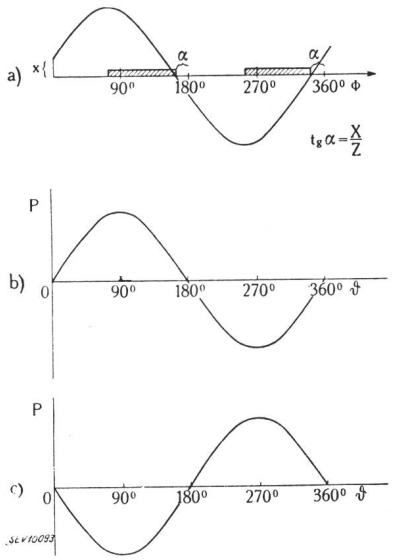

Fig. 5.
Graphische Darstellung der Wirkleistung
bei einer Energieübertragung nach dem Schema von Fig. 4.
a) Nenner der Gl. (2), in Funktion von Φ, für $\frac{X}{Z} = 0{,}3$.
Schraffierte Teile: Bereiche der Leitungslänge, in denen die natürliche Leistung nicht statisch stabil übertragen werden kann.
b) Uebertragene Wirkleistung P in Funktion des Polradwinkels ϑ, für $\Phi < (180^0 - \alpha)$.
c) Desgleichen für $(180^0 - \alpha) < \Phi < (360^0 - \alpha)$

Wir werden am Schlusse des Vortrages auf Leitungen mit ungefähr $\Phi = 180^0$ und Vielfache davon zurückkommen. Hier sei zunächst noch der weitere Verlauf des Nenners von Gl. (2) verfolgt, wobei man feststellt, dass er in einem gewissen Bereich negative Werte annimmt. Was das bedeutet, erkennt man am besten, wenn man die ganze Gl. (2) in Funktion von ϑ aufträgt, wie das in Fig. 5b und c gemacht wurde. Da diese abstrakten Untersuchungen etwas schwer verständlich sind, soll noch besonders hervorgehoben werden, dass Fig. 5a zeigt, wie sich die Verhältnisse bei Veränderung der Leitungslänge ändern (Abszisse Φ), während die Fig. 5b und c nur für eine ganz bestimmte Leitungslänge gelten und zeigen, wie die Wirkleistung bei einer gegebenen Leitungslänge vom Polradwinkel abhängt. Fig. 5b gilt für positive Werte des Nenners ($\Phi < 180^0 - \alpha$), Fig. 5c für negative Werte des Nenners in Gl. (2), d. h. $(180^0 - \alpha) < \Phi < (360^0 - \alpha)$.

[8]) Siehe Abschnitt III 1.

Fig. 5b ist die «Stabilitätskurve», mit der man üblicherweise rechnet. Eine stabile Leistungsübertragung vom Kraftwerk über die Uebertragungsleitung in das am andern Ende angeschlossene Netz ist nur möglich bei Werten von ϑ, die zwischen 0 und 90° liegen, während die nach rechts abfallenden Teile der Kurve instabilen, d. h. praktisch unmöglichen Betriebszuständen entsprechen. Es lässt sich nun leicht feststellen, dass bei der in Fig. 5c untersuchten Leitung eine stabile Leistungsübertragung in der gewünschten Richtung nur für Werte von ϑ zwischen 180 und 270° möglich ist, während sie bei den sonst normalen Werten zwischen 0 und 90° hier ausgeschlossen ist.

Die Kurven der Wirkleistung in Funktion des Polradwinkels ϑ haben immer einen stabilen Teil, so dass theoretisch bei jeder Leitungslänge die Uebertragung von Wirkleistung möglich ist, wenn auch teilweise unter ganz ungewohnten Bedingungen (Fig. 5c). Eine Erschwerung des Betriebes bedeutet die anormale Synchronisierung. In einem gewissen Bereich der Leitungslängen ist nämlich eine Synchronisierung, bei der weder Wirk- noch Blindlaststösse auftreten, überhaupt nicht möglich. Da jedoch die anormale Synchronisierung nur in einem Gebiet vorkommt, das aus andern Gründen ohnehin ausscheidet, so brauchen wir uns nicht weiter damit zu befassen.

Wir haben im vorherigen Abschnitt gesehen, dass eine lange Leitung am vorteilhaftesten mit der natürlichen Leistung betrieben wird und dass grössere Abweichungen von diesem Betriebszustand aus wirtschaftlichen Gründen nicht zulässig sind. Es interessiert uns daher vor allem, bei welchen Leitungslängen diese Art der Uebertragung stabil ist. Die gestellte Frage lässt sich sehr leicht beantworten, wenn man sich daran erinnert, dass bei der Uebertragung der natürlichen Leistung die Phasenverschiebung zwischen den Spannungen am Anfang und Ende der Leitung gerade so gross ist wie die Leitungslänge in Winkelmass. In erster Näherung muss also der Polradwinkel ϑ gleich dem Winkel Φ sein. Man sieht dann z. B. aus Fig. 5b, dass die gewünschte Uebertragung möglich ist für Leitungslängen, deren Φ zwischen 0 und 90° liegt, dagegen nicht für Werte von Φ zwischen 90 und 180°, weil sonst ϑ auch in diesem Bereich liegen müsste; das ist aber ausgeschlossen, weil der Betrieb dort nicht stabil ist.

Eine genauere Untersuchung muss berücksichtigen, dass der Polradwinkel ϑ ausser der Phasenverschiebung längs der Leitung auch noch die innere Phasenverschiebung in den Generatoren umfasst. Die stabile Uebertragung der natürlichen Leistung ist daher nur bis zu einer Leitungslänge möglich, deren Φ etwas kleiner als 90° ist. Unter gewissen plausiblen Voraussetzungen [9]) findet man als obere Grenze etwa $\Phi = 70°$ oder eine höchst zulässige Leitungslänge von 1200 km. Darüber hinaus ist die Uebertragung der natürlichen Leistung unmöglich in dem in Fig. 5a schraffiert angegebenen Bereich (bis etwa $\Phi = 160°$), sie ist wieder möglich von dort bis ungefähr $\Phi = 250°$ usw.

Alle diese Ueberlegungen beziehen sich ausschliesslich auf die statische Stabilität, d. h. sie beantworten die Frage, ob die Uebertragung bei einem ruhigen Dauerbetrieb mit konstanter Belastung möglich ist. Nun soll aber die Stabilität auch noch bei langsamen aber plötzlichen Laständerungen, bei vorübergehenden Kurzschlüssen und dgl. gewahrt bleiben. Die Verhältnisse, die diese dynamische Stabilität beeinflussen, sind von Fall zu Fall sehr verschieden. Um doch gewisse allgemeine Schlussfolgerungen ziehen zu können, kann man die Erschwerung des Problems durch die Anforderungen der dynamischen Stabilität dadurch berücksichtigen, dass man im stationären Betrieb keine Belastung bis auf das Maximum der «Stabilitätskurve» (Fig. 5b und c) zulässt, sondern etwas weniger. Es scheint plausibel, diese Belastung auf $^2/_3$ der maximalen zu begrenzen; dann darf ϑ in Fig. 5b nicht grösser als 42° werden. Unter dieser Bedingung und unter den gleichen Voraussetzungen wie oben findet man weiter, dass die dynamisch stabile Uebertragung der natürlichen Leistung bis zu einem Wert von $\Phi = 25°$ oder gut 400 km Leitungslänge möglich ist. Darauf folgt ein Sperrgebiet, und erst in der Nähe von 180° oder 3000 km ist die Uebertragung wieder in einem relativ engen Bereich möglich usw.

Uns interessiert zunächst der unterste Bereich. Bis gut 400 km kann also die natürliche Leistung dynamisch stabil übertragen werden. Das ist aber gerade ungefähr die Grenze, bis zu der bisher überhaupt Drehstromübertragungen ohne Zwischenanschluss von Netzen ausgeführt worden sind. Die längste mir bekannte Uebertragung ist die vom Boulder Dam nach Los Angeles mit 266 Meilen oder 430 km. Wegen der Frequenz 60 Hz entspricht diese Leitung einer etwas grösseren Länge bei 50 Hz, aber dafür sind die Synchronmaschinen extra gross, d. h. mit anormal kleiner Reaktanz ausgelegt worden. Man arbeitet daher auch bei dieser wohl längsten ausgeführten Leitung gerade noch in einem Bereich, in dem die Uebertragung der natürlichen Leistung ohne besondere Massnahmen statisch und dynamisch stabil ist. Aber jede Vergrösserung der Leitungslänge über das heute Bestehende hinaus macht sofort solche Massnahmen erforderlich.

3. Erweiterung der Stabilitätsgrenzen durch Drosselspulen und Kondensatoren.

Ein Mittel zur Erweiterung der Stabilitätsgrenzen besteht in einer teilweisen Kompensation der Induktivität oder Kapazität der Leitung, und zwar gibt es grundsätzlich zwei Möglichkeiten: entweder man kompensiert die Kapazität c der Leitung (angedeutet in Fig. 6a) teilweise durch Querdrosselspulen (vgl. Fig. 6b), oder man kompensiert die Längsinduktivität l der Leitung teilweise durch Seriekapazitäten (Fig. 6c). Wie die rechnerische Untersuchung zeigt, haben beide Massnahmen zur Folge, dass die wirksame Leitungslänge verkürzt wird. Selbstverständlich gelan-

[9]) Siehe Brown-Boveri-Mitt. Oktober 1941, S. 264.

gen Wanderwellen, die bei Ausgleichsvorgängen vorkommen, nicht rascher von einem Ende der Leitung zum andern; aber für alle betriebsfrequenten Vorgänge wirkt die kompensierte Leitung wie eine Leitung geringerer Länge. Durch eine Kompensation nach Fig. 6b oder c kann daher jede Leitung

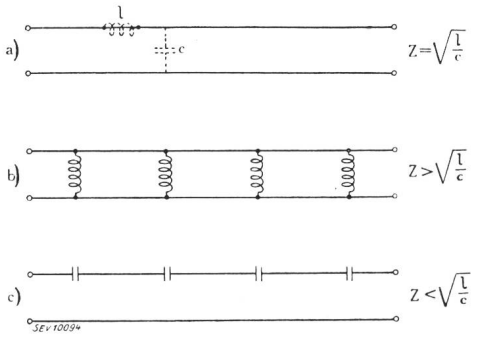

Fig. 6.
Statische Kompensation einer langen Leitung.
a) Unkompensierte Leitung.
b) Kompensation mit Querdrosselspulen.
c) Kompensation mit Seriekapazitäten.

so verkürzt werden, dass sie sich in bezug auf die Stabilität wie eine Leitung von höchstens 400 km verhält.

Durch die Kompensation wird auch der wirksame Wellenwiderstand der Leitung verändert. Dieser ist bekanntlich

$$Z = \sqrt{\frac{l}{c}}.$$

Da in Fig. 6b die Kapazität c der Leitung durch die Querdrosselspule verkleinert wird, nimmt der Wellenwiderstand zu; dagegen ist der Wellenwiderstand in Fig. 6c kleiner als bei der unkompensierten Leitung [10]).

Von dieser Möglichkeit, den Wellenwiderstand zu beeinflussen, macht man bei der Uebertragung von Teillast Gebrauch. Eine Leitung von höchstens 400 km Länge braucht ja bei Uebertragung der natürlichen Leistung keine Kompensation. Damit man aber auch Teillast als natürliche Leistung übertragen kann, muss man den Wellenwiderstand der kleinern Leistung anpassen [11]), was üblicherweise durch Querreaktanzen gemacht wird. Man kann sich natürlich auch so ausdrücken, dass im Leerlauf und bei kleiner Belastung die Kapazität der Leitung durch Drosselspulen mehr oder weniger kompensiert wird, um eine zu grosse kapazitive Belastung der Generatoren zu vermeiden; aber von einem allgemeinern Gesichtspunkt aus betrachtet, handelt es sich tatsächlich um eine Anpassung des Wellenwiderstandes an die jeweilige Last, so dass jede beliebige Teillast bis auf Null hinunter als natürliche Leistung übertragen werden kann. Im Extremfall der Leistung null wird die Leitungskapazität vollständig kompensiert; der Wellenwiderstand ist dann unendlich gross.

Kehren wir nun wieder zu den wirklich langen Leitungen zurück, die aus Stabilitätsgründen auch bei Vollast kompensiert werden müssen. Wir wollen sie nur gerade soviel kompensieren als zur Erhaltung der dynamischen Stabilität erforderlich ist, wollen sie also auf eine wirksame Länge von $\Phi = 25^\circ$ (d. h. ca. 400 km) zurückführen. Da durch die Kompensation mit Querdrosselspulen der Wellenwiderstand vergrössert wird, wird die natürliche Leistung kleiner. Aus wirtschaftlichen Gründen will man aber immer mit der natürlichen Leistung arbeiten und kann daher bei gleichbleibender Spannung nur eine kleinere Leistung übertragen; sie wird um so kleiner, je länger die Leitung ist, je mehr diese also durch die Kompensation verkürzt werden muss. Umgekehrt muss bei der Kompensation mit Seriekondensatoren eine grössere Leistung übertragen werden als die natürliche Leistung der ursprünglichen Leitung.

Diese Verhältnisse sind in Fig. 7 für eine Uebertragungsspannung von 400 kV dargestellt (Kurven *1*). Gleichzeitig geben die Kurven *2* an, welche Kompensations-Blindleistung pro 100 km Leitungslänge erforderlich ist. Meistens ist es nun aber so, dass nicht die Spannung festliegt, sondern dass eine bestimmte Leistung übertragen werden muss und sich die Spannung danach zu richten hat. Daher ist in

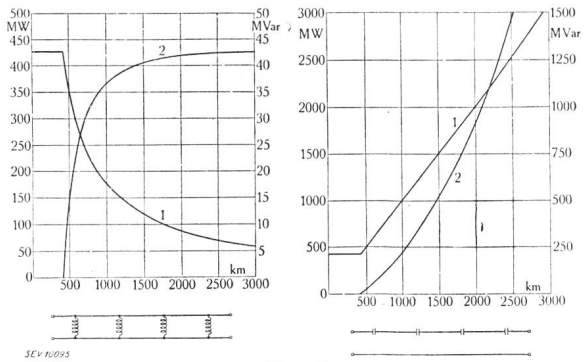

Fig. 7.
Verhalten einer langen Leitung mit «minimaler» Kompensation bei einer konstanten Uebertragungsspannung von 400 kV.
Wellenwiderstand 375 Ω; Generatorreaktanz 30 %.
Links: Mit Drosselspulen kompensierte Leitung.
Rechts: Mit Kapazitäten kompensierte Leitung.
Kurven *1*: Die als natürliche Leistung übertragbare Wirkleistung (in MW), in Funktion der Leitungslänge.
Kurven *2*: Die dabei erforderliche Kompensations-Blindleistung pro 100 km (in MVar), in Funktion der Leitungslänge.

Fig. 8 (Kurven *1*) gezeigt, wie gross die Spannung bei verschiedenen Leitungslängen gewählt werden muss, wenn in jedem Fall eine Leistung von 500 MW als natürliche Leistung übertragen werden soll. Die linke Hälfte der Fig. zeigt, dass bei Kompensation durch Drosselspulen die Spannung mit zunehmender Leitungslänge immer grösser werden muss; die rechte Hälfte zeigt, dass bei Kompensation

[10]) Wie R. Rüdenberg gezeigt hat, haben Längsdrosseln im Zuge der Leitung den gleichen Einfluss auf den Wellenwiderstand wie Querdrosseln, sofern die Blindleistung der Drosseln in beiden Fällen gleich gross ist. Aber die Längsdrosseln vergrössern die wirksame Leitungslänge, verschlechtern also die Stabilität statt sie zu verbessern. Analog verhält es sich mit Kondensatoren, die quer zur Leitung angeschlossen werden statt längs (wie in Fig. 6 c).

(R. Rüdenberg, «Das Verhalten elektrischer Kraftwerke und Netze beim Zusammenschluss.» ETZ 1929/II, S. 970...984; vgl. S. 978.)

[11]) Sofern man nicht bei Teillast mit kleinerer Spannung arbeiten will.

durch Kondensatoren die Spannung um so kleiner sein muss, je länger die Leitung ist. Die Kurven *2* geben die erforderliche Kompensations-Blindleistung pro 100 km Leitungslänge an; Kurve *3* zeigt die Grösse dieser Blindleistung, wenn auch jede Teillast bis auf Null hinunter als natürliche Lei-

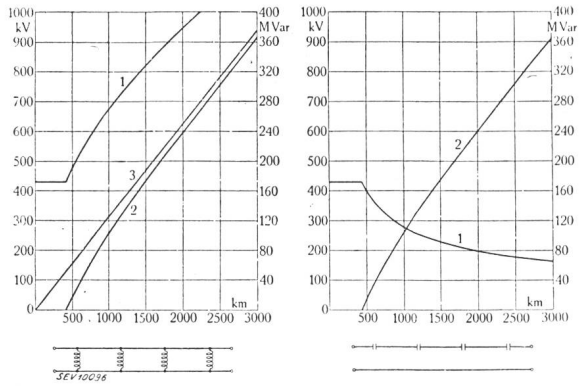

Fig. 8.

Verhalten einer langen Leitung mit «minimaler» Kompensation bei Uebertragung von 500 MW als natürlicher Leistung.

Wellenwiderstand 375 Ω; Generatorreaktanz 30 %.

Links: Mit Drosselspulen kompensierte Leitung.
Rechts: Mit Kapazitäten kompensierte Leitung.
Kurven *1*: Erforderliche Uebertragungsspannung (in kV).
Kurven *2*: Erforderliche Kompensationts-Blindleistung pro 100 km (in MVar).
Kurve *3*: Im Leerlauf benötigte Kompensations-Blindleistung pro 100 km (in MVar).

stung übertragen werden soll. In diesem Fall müssen die Drosselspulen in Abhängigkeit von der Belastung reguliert werden, und zwar zwischen den Grenzen, die durch die Kurven *2* und *3* (links in der Figur) angegeben werden.

Es ist sehr unangenehm, dass bei jedem der beiden Kompensationssysteme die Spannung durch die Forderung der Uebertragung mit natürlicher Leistung genau vorgeschrieben ist. Man wird auf diese

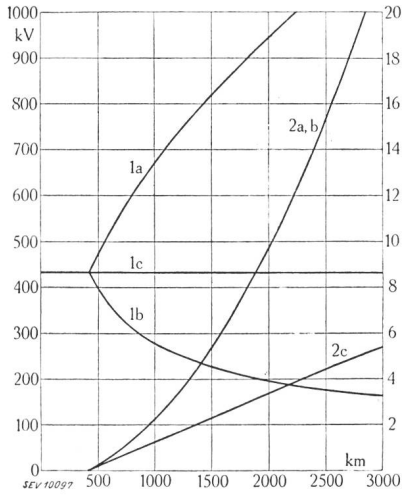

Fig. 9.

Verhalten einer langen Leitung mit «minimaler» Kompensation bei Uebertragung von 500 MW als natürlicher Leistung.

Wellenwiderstand 375 Ω; Generatorreaktanz 30 %.

Kurven *1*: Erforderliche Spannung (in kV).
Kurven *2*: Erforderliche Kompensations-Blindleistung der ganzen Leitung, als vielfaches der übertragenen Wirkleistung.
a Kompensation durch Querdrosselspulen.
b Kompensation durch Seriekapazitäten.
c Kombinierte Kompensation mit gleicher Blindleistung der Drosselspulen und Kapazitäten.

Art zum Sklaven der Stabilitätsbedingungen, statt dass man die Uebertragungsspannung nach wirtschaftlichen Gesichtspunkten wählen kann. Glücklicherweise ermöglicht nun die Kombination der beiden Kompensationsmethoden, wieder ziemlich frei über die Spannung zu verfügen. In Fig. 9 sind

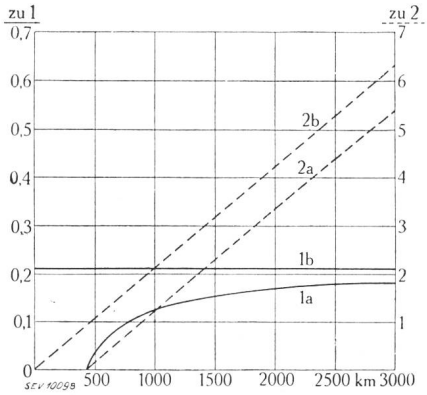

Fig. 10.

Verhalten einer langen Leitung bei Kompensation durch Drosselspulen und Kapazitäten, wobei die Leistung beider gleich ist.

Kurven *1*: Kompensations-Blindleistung pro 100 km, als Vielfaches der übertragenen Wirkleistung.
Kurven *2*: Kompensations-Blindleistung der ganzen Leitung, als Vielfaches der übertragenen Wirkleistung.
a «Minimale» Kompensation, d. h. Reduktion auf eine Leitungslänge entsprechend $\Phi = 25°$.
b Vollständige Kompensation.

nochmals die erforderlichen Spannungen bei Kompensation mit Drosselspulen allein, bzw. mit Kondensatoren allein aufgetragen (Kurve *1a*, bzw. *1b*). Verwendet man gleichzeitig Drosselspulen und Kondensatoren, so ist jede beliebige Spannung, die irgendwo zwischen den beiden Kurven liegt, möglich.

Besonders interessant ist eine Ausführung, bei der die Drosselspulen und Kondensatoren gleiche Blindleistung haben. In diesem Fall wird der Wellenwiderstand der Leitung durch die Kompensation überhaupt nicht verändert; die erforderliche Spannung ist bei jeder Leitungslänge gleich gross (Kurve *1c*). Diese Lösung bietet dabei erst noch den Vorteil, dass die totale Kompensationsleistung am kleinsten wird, und zwar wesentlich kleiner als bei Kompensation mit Drosselspulen oder mit Kondensatoren allein (vgl. die Kurven 2a, b und 2c).

Wir haben bisher bei Leitungen bis etwa 400 km Länge für die Uebertragung der Vollast überhaupt keine Kompensation vorgesehen (vgl. Fig. 9) und längere Leitungen nur soweit kompensiert, dass sie auf eine wirksame Länge von 400 km reduziert wurden. Selbstverständlich kann man die Kompensation noch weiter treiben und z. B. die Leitung auf die Länge Null reduzieren, indem man die Leitungskapazität durch Querdrosselspulen und die Leitungsinduktivität durch Längskondensatoren *vollständig* kompensiert. Fig. 10 zeigt aber, dass dabei ein beträchtlicher Mehraufwand an Kompensationsleistung erforderlich ist. Die Mindestkompensation, von der wir vorher gesprochen hatten, gestattet insbesondere zwischen 400 und 1000 bis 1500 km wesentliche Einsparungen gegenüber der

vollständigen Kompensation. Das ist aber gerade der Bereich der Leitungslängen, der für die Höchstleistungsübertragung der nächsten Zukunft besonders interessant ist.

Als weiteres statisches Kompensationsmittel hat A. M. Taylor die Verwendung von Quertransformatoren vorgeschlagen [12]). Seine Methode hat in den letzten Jahren so viel von sich reden gemacht, dass es nötig erscheint, einmal klarzustellen, was sich damit erreichen lässt und was nicht. Die Blindleistung, die zur Kompensation der Leitungsinduktivität erforderlich ist, wird bei dieser Methode von der Leitungskapazität geliefert, die dadurch gleichzeitig ebenfalls kompensiert wird. Fig. 11a zeigt grundsätzlich, wie die Blindleistung mit Hilfe des Quertransformators von einer Lage in die andere übertragen wird. Der Uebersichtlichkeit halber ist nur ein einphasiges Schema angegeben; tatsächlich sind die 3 Phasen so miteinander kombiniert, dass in Serie mit der Leitung eine Spannung induziert wird, die der Spannung quer zur Leitung um 90° voreilt (Fig. 11b).

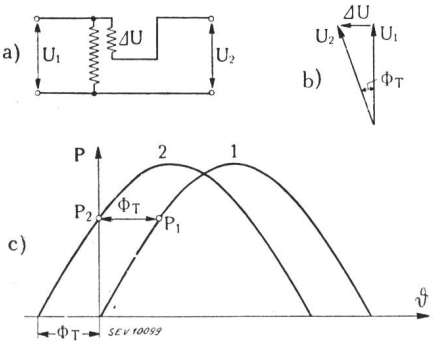

Fig. 11.
Wirkungsweise des Taylor-Transformators.
a) Einpoliges Schema.
b) Vektordiagramm.
c) Ueber eine lange Leitung übertragene Wirkleistung P, in Funktion des Polradwinkels ϑ.
Kurve *1*: Leitung ohne Taylor-Transformator.
Kurve *2*: Leitung mit Taylor-Transformator.
P_1, P_2: Arbeitspunkte bei Uebertragung der natürlichen Leistung.

Die Idee des Taylor-Transformators ist bestechend: da bekanntlich bei Uebertragung der natürlichen Leistung die Blindleistung in der Leitungsinduktivität entgegengesetzt gleich wie in der Leitungskapazität ist, lässt sich tatsächlich die Kompensation durch eine solche «Schiebung» der Blindleistung erreichen. Man bringt es also auf diese Art zustande, dass die Phasenverschiebung zwischen den Spannungen am Anfang und Ende der Leitung bei Uebertragung der natürlichen Leistung Null wird, genau wie bei einer vollständig kompensierten Leitung. Das heisst nun aber noch lange nicht, dass deswegen die Stabilität besser geworden sei; für die Stabilität ist nicht die Phasenverschiebung bei Nennlast massgebend, sondern der Verlauf der Wirkleistung in Funktion dieser Phasenverschiebung.

Man entnimmt leicht aus dem Vektordiagramm Fig. 11b, dass der Taylortransformator einfach eine Verdrehung des Spannungsvektors bewirkt, und zwar ist der Verdrehungswinkel, abgesehen von Streuspannungsabfällen und dgl., vom durchfliessenden Strom unabhängig. Die Phasenverschiebung zwischen den Spannungen am Anfang und Ende einer Leitung kann also mit der Taylormethode um einen bestimmten, von der Belastung unabhängigen Betrag verkleinert werden. Das bedeutet, dass die Kurve der Wirkleistung in Funktion der Phasenverschiebung ϑ parallel zu sich verschoben wird (vgl. Kurven 1 und 2 in Fig. 11c). Der Winkel ϑ ist jetzt Null bei Uebertragung der natürlichen Leistung, statt bei Wirkleistung Null. Aber die Stabilitätskurve hat genau die gleiche Form und den gleichen Scheitelwert wie bei der Leitung ohne Taylortransformator, und der Arbeitspunkt (P_2 resp. P_1) ist genau gleich weit vom Scheitelpunkt entfernt. Die Stabilität der Uebertragung wird also durch Taylortransformatoren überhaupt nicht verändert.

Zur Kontrolle dieser Ueberlegungen wurden noch Versuche an einem dreiphasigen Leitungsmodell von 770 km Länge durchgeführt. Es konnten natürlich nur die stabilen Teile der Leistungskurven gemessen werden. Sie sind für 3 verschiedene Werte der Spannung in Fig. 12 aufgetragen, und zwar liegen die Kurven ohne Taylortransformator rechts, die mit Taylortransformator links. Diese Messresultate bestätigen einwandfrei, dass der Taylortransformator nur eine Parallelverschiebung der Leistungskurven bewirkt. Das Aussertrittfallen (oberes Ende der Kurven) erfolgt mit und ohne Transformator ungefähr beim gleichen Wert der übertragenen Leistung. Die Taylormethode ist also leider nicht imstande, die Stabilität langer Leitungen irgendwie zu verbessern.

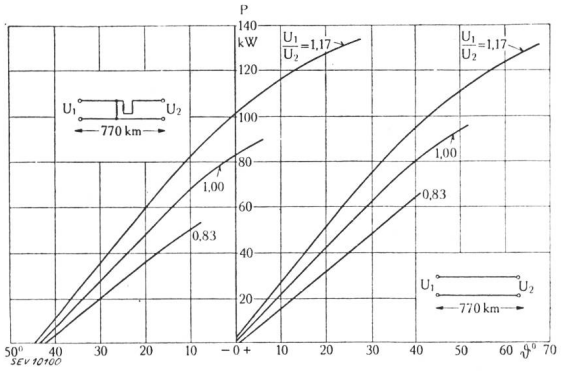

Fig. 12.
Versuche an einem Leitungsmodell, mit und ohne Taylor-Transformator.
Uebertragene, am Leitungsende abgegebene Wirkleistung in Funktion des Polradwinkels ϑ.
Links: Mit Taylor-Transformator.
Rechts: Ohne Taylor-Transformator.
Bemerkung:
1. Natürliche Leistung der Leitung $P_n = 93$ kW bei $U_1 = U_2 = 240$ V. Bei allen Versuchen war $U_2 = 240$ V.
2. Alle Kurven sind so weit hinauf gezeichnet, als die Uebertragung möglich war. Das Ende der Kurven gibt also die Stabilitätsgrenze an.

[12]) Vgl. z. B. A. M. Taylor: Power Transmission. The Eletrician 1939, S. 531.
H. Rissik: The Future of Alternating Current Power Transmission. Engg. 1939, S. 33.
H. Rissik: The Coming Crisis in Electrical Power Transmission. The Engineer 1941, S. 348 und 366.

4. Erweiterung der Stabilitätsgrenzen durch rotierende Maschinen.

Wenn es nicht möglich ist, Transformatoren an Stelle der Kompensations-Drosselspulen und -Kondensatoren zu verwenden, so können diese dagegen durch Synchronmaschinen ersetzt werden. Von dieser Möglichkeit wird seit langem bei der induktiven Querkompensation Gebrauch gemacht. Ein parallel zur Leitung angeschlossener Synchron-Phasenschieber liefert nicht nur die Blindleistung, die zur teilweisen oder vollständigen Kompensation der Leitungskapazität erforderlich ist, sondern er hält ausserdem während Leistungspendelungen und dergleichen die Spannung aufrecht. Dieser Vorteil darf aber nicht überschätzt werden. Wir wollen daher die Verhältnisse etwas genauer untersuchen.

Mit den heute verfügbaren technischen Mitteln ist es nicht möglich, die Klemmenspannung eines Phasenschiebers während Ausgleichsvorgängen konstant zu halten, sondern nur eine gewisse innere Spannung der Maschine. Zwischen dieser (E_q) und der Leitung liegt dann noch eine Reaktanz X_q, d. i. etwa die Streureaktanz der Maschine (vgl. das Schema in Fig. 13). Bei der Kompensation durch eine Drosselspule fehlt diese innere Spannung ganz; dafür ist die Reaktanz X_q entsprechend grösser.

In Fig. 13 ist eine Leitung von 1000 km Länge untersucht, bei der am Anfang und Ende die Spannung auf 400 kV eingestellt wird. Durch Querkompensation in der Mitte wird nun die Leitung auf eine wirksame Länge von $\Phi = 25°$ (ca. 400 km) reduziert, und zwar einmal durch Drosselspulen, ein

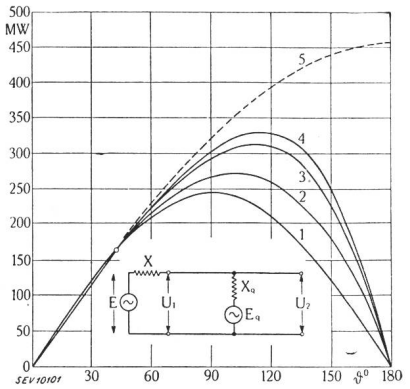

Fig. 13.

Vergleich der Energie-Uebertragung bei Kompensation mit Drosselspulen oder mit Synchron-Phasenschiebern.

Leitungslänge 1000 km, Kompensation in der Mitte, Wellenwiderstand 375 Ω. $X = 300\ \Omega$, $U_1 = U_2 = 400$ kV.

Kurve *1*: Kompensation mit Drosselspule, $X_q = 400\ \Omega$

Kurve *2*: Kompensation mit Synchronmaschine, $X_q = 120\ \Omega$

Kurve *3*: Kompensation mit Synchronmaschine, $X_q = 20\ \Omega$

Kurve *4*: Kompensation mit Synchronmaschine, $X_q = 0$

Kurve *5*: Verlauf der Wirkleistungskurve, wenn der Phasenschieber die Leitung in zwei voneinander unabhängige Abschnitte unterteilen würde.

andermal durch Phasenschieber. Kurve *1* zeigt die übertragene Wirkleistung in Funktion des Polradwinkels ϑ, d. h. der Phasenverschiebung zwischen Anfang und Ende der Uebertragung, bei Kompensation durch Drosselspulen. Kurve *2* gilt für den Fall, dass ein Phasenschieber üblicher Bauart zur Kompensation verwendet wird. Der Scheitelwert dieser Kurve liegt etwas höher und gegenüber der Kurve *1* nach rechts verschoben. Die Stabilität ist tatsächlich bei der Kompensation durch Phasenschieber etwas besser als bei der Kompensation durch Drosselspulen, aber der Unterschied ist überraschend gering. Es ist also keine Rede davon, dass etwa die in der Mitte angeschlossene Synchronmaschine die Leitung in zwei Teile aufspaltet, so dass das Stabilitätsproblem nur noch für die halbe Leitungslänge gelöst werden müsste. Diese ziemlich verbreitete Auffassung ist absolut irrig.

Die Stabilität wird erst dadurch wesentlich verbessert, dass die Reaktanz X_q des Phasenschiebers verkleinert wird, was durch eine entsprechende Vergrösserung seiner Typenleistung erreicht werden muss. Kurve *3* gilt für eine 6mal kleinere Reaktanz X_q, Kurve *4* für den Grenzfall verschwindend kleiner Reaktanz. Eine Aufteilung der Leitung in zwei bezüglich Stabilität unabhängige Abschnitte wäre jedoch erst dann erreicht, wenn die Wirkleistungskurve bis zu $\vartheta = 180°$ ständig ansteigen würde, entsprechend Kurve *5*. Eine solche Kurve erhält man aber nur, wenn auch der Synchrongenerator am Anfang der Leitung eine vernachlässigbar kleine Reaktanz hat.

Diese Kurven zeigen, dass eine Phasenschieberstation im Zuge einer Leitung diese niemals in unabhängige Abschnitte unterteilt. Befinden sich dagegen längs der Leitung Kraftwerke oder Verbrauchszentren mit einer grossen totalen Synchron-Maschinenleistung, so lässt sich die Stabilität durch die Parallelschaltung dieser Maschinen mit der Leitung bedeutend verbessern (Kurven *3* oder *4* statt *1*). Ist keine solche Möglichkeit vorhanden, so wird man die Phasenschieber im Zuge der Leitung in der Regel nicht wesentlich grösser auslegen können, als zur Blindleistungskompensation erforderlich ist, und erreicht dann gegenüber der Methode mit Drosselspulen nur eine recht mässige Verbesserung der Stabilität (Kurve *2* statt *1*). Man wird sich also im konkreten Fall gut überlegen müssen, ob es sich lohnt, die grössern Verluste und den höhern Preis der Phasenschieber in den Kauf zu nehmen. Allerdings darf man nicht übersehen, dass die bessere Spannungshaltung der Synchronmaschinen schon an sich einen Vorteil darstellt und nicht nur wegen der Verbesserung der Stabilität erwünscht ist.

Die Kurven der Fig. 13 zeigen, wie wichtig es ist, die massgebende Reaktanz der Synchronmaschinen klein zu halten, und zwar selbstverständlich nicht nur bei den Phasenschiebern, sondern auch bei den Generatoren. Nun hängt aber die Grösse dieser Reaktanz weitgehend von der Spannungsregelung ab. Hat eine Maschine überhaupt keine automatische Spannungsregelung, so hat der Erregerstrom die Tendenz — konstant zu bleiben, und es ist — zum mindesten für langsame Vorgänge — die sehr grosse synchrone Reaktanz massgebend. Ist die Spannungsregelung dagegen sehr rasch, so ist im wesentlichen nur die Streureaktanz im Spiel, weil es gelingt, die hinter der Streureaktanz liegende innere Spannung der Maschine einigermassen konstant zu halten.

Die beste Spannungshaltung bei Ausgleichsvorgängen ergibt sich mit einem schwach gesättigten Erreger, der derart in Serie erregt wird, dass seine Spannung bei jedem Erregerstrom im indifferenten Gleichgewicht ist. Es dürfte nicht allgemein bekannt sein, dass es gelingt, einen solchen Serieerreger durch eine kleine Fremderregerwicklung in Verbindung mit einem Schnellregler zu stabilisieren. Das Oszillogramm Fig. 14. zeigt das Verhalten einer

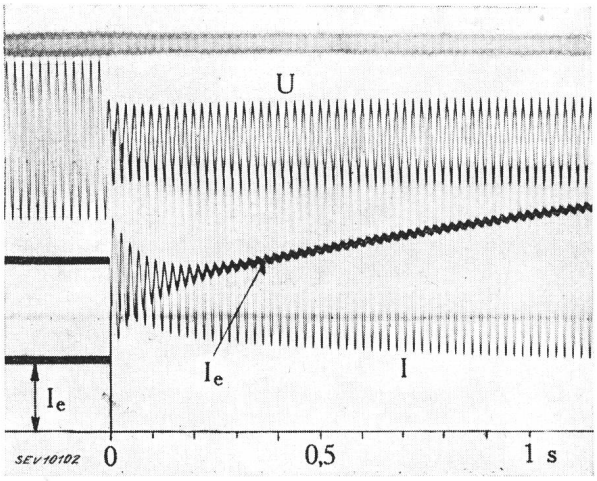

Fig. 14.
Plötzlicher dreipoliger Teil-Kurzschluss eines Synchrongenerators
von 1100 kVA, 1100 V und 500 U./min, ausgerüstet mit einem serieerregten Erreger gemäss Schema in Fig. 15.
U Klemmenspannung. *I* Klemmenstrom. I_e Erregerstrom.

derart erregten Synchronmaschine, wenn sie, ausgehend vom Leerlauf, plötzlich so heftig induktiv belastet wird, dass ihre Klemmenspannung auf die Hälfte zusammenbricht.

Fig. 15 gibt die Auswertung verschiedener derartiger Oszillogramme, und zwar ist links der Verlauf der Klemmenspannung U aufgetragen, rechts der Verlauf des Erregerstromes I_e und der hinter der subtransienten Reaktanz liegenden innern Spannung E_0. Jeweils die unterste Kurve (*a*) zeigt, wie die verschiedenen Grössen bei unregulierter Spannung abfallen, die mittlere Kurve (*b*) zeigt die Wirkung der Serieerregung allein (Schnellregler

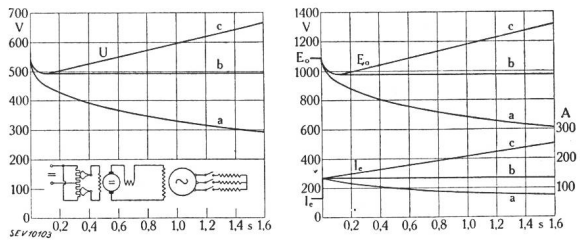

Fig. 15.
Plötzlicher Teil-Kurzschluss
an der gleichen Maschine wie in Fig. 14.
a Versuch ohne Serieerregung, mit konstanter Fremderregung des Haupterregers.
b Versuch mit serieerregtem Haupterreger, ohne Fremderregung.
c Versuch mit serieerregtem Haupterreger und Schnellregler im Fremderregerkreis.
U Klemmenspannung. E_0 Hinter der subtransienten Reaktanz liegende innere Spannung des Generators. I_e Gleichstromglied des Erregerstromes.

blockiert), die oberste Kurve (*c*) ihre Wirkung in Kombination mit dem Schnellregler.

Es ist bemerkenswert, dass die Serieerregung imstande ist, den Erregerstrom auf dem Wert, auf den er im Moment der Lastzuschaltung sprungartig steigt, absolut konstant zu halten. Die hinter der subtransienten Reaktanz liegende innere Spannung E_0 fällt nur ganz wenig ab und bleibt dann ebenfalls konstant. Durch das Eingreifen des Schnellreglers bei gleichzeitiger Verwendung der Serieerregung kann E_0 sehr rasch wieder zum Steigen gebracht werden (Kurve *c*). In diesem Fall ist die massgebende Reaktanz gerade etwa gleich der subtransienten, also ausserordentlich klein. Natürlich kann man auch eine Stosserregungsschaltung mit der Serieerregung kombinieren und dadurch erreichen, dass die Spannung noch rascher und höher steigt. Keine der üblichen Stosserregungsmethoden kann aber verhindern, dass die Erregung zunächst beträchtlich abfällt, bevor sie wieder ansteigt; das bringt nur die Serieerregung fertig, da sie absolut verzögerungsfrei arbeitet.

Nach diesem kleinen Exkurs ins Gebiet der Regulierung kehren wir zur Leitungs-Kompensation zurück. Es wäre vorteilhaft, wenn man auch die Seriekondensatoren durch Synchronmaschinen ersetzen könnte. Obwohl sich die Schwierigkeiten, die die Kondensatoren bieten, überwinden lassen — sind doch schon derartige Anlagen ausgeführt worden [13]) —, so würde man sie doch lieber vermeiden. Nun zeigt allerdings das Studium der Synchronmaschine in Serieschaltung [14]), dass sie im übererregten Zustand unstabil ist, im Gegensatz zur Maschine in Parallelschaltung, die bekanntlich bei Uebererregung die beste Stabilität aufweist. Eine Seriemaschine kann daher für sich allein überhaupt nicht in einem Zustand laufen, in dem sie wie eine Kapazität wirkt. Man muss sie mit einer zweiten Maschine kuppeln, die parallel zur Leitung angeschlossen ist. Das ist an sich kein Nachteil, da man ja ohnehin auch quer zur Leitung Kompensationsleistung braucht. Da jedoch die quer angeschlossene Synchronmaschine untererregt ist, ist sie selber nicht sehr stabil und muss daher wohl in vielen Fällen überdimensioniert werden, wenn sie auch noch die Seriemaschine stabilisieren soll.

Diese Schwierigkeiten mit Synchronmaschinen legen den Gedanken nahe, die Kompensation mit Asynchronmaschinen durchzuführen. Diesen muss selbstverständlich im Rotor eine passende Spannung mit Schlupffrequenz zugeführt werden. Wir können auch hier nicht auf die Ableitung eingehen, sondern nur kurz das Resultat angeben.

In Fig. 16 ist das Verhalten der Asynchron-Blindleistungsmaschine für Parallel- und Serieschaltung dargestellt. Als Abszisse ist die dem Rotor aufgedrückte Spannung E_e aufgetragen, positiv im Sinne einer Uebererregung, negativ im Sinne einer Untererregung. Die Ordinate stellt die aufgenommene Blindleistung Q dar, und zwar positiv für

[13]) Vgl. E. K. Shelton: The Series Capacitor Installation at Ballston. Gen. El. Rev. 1928, S. 432.

[14]) Theoretische und experimentelle Untersuchungen!

den Fall, dass sich die Maschine wie eine Induktivität verhält. Die Stabilitätsgrenzen sind durch Schraffur angegeben. Interessanterweise ist die Asynchronmaschine genau wie die Synchronmaschine bei Parallelschaltung im übererregten Zustand am stabilsten, während sie bei Serieschaltung gerade im übererregten Betrieb unstabil wird.

Die Stabilitätsgrenzen liegen aber bei der Asynchronmaschine in beiden Fällen günstiger. Sie ist in Parallelschaltung nämlich stabil bis zu einer

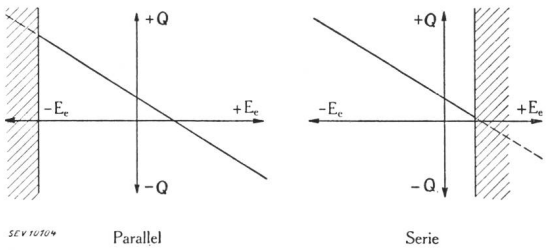

Fig. 16.
Verhalten der Asynchron-Blindleistungsmaschine.
Links: In Parallelschaltung (Klemmenspannung konstant).
Rechts: In Serieschaltung (Statorstrom konstant).
E_e Spannung, die dem Rotor mit Schlupffrequenz aufgedrückt wird. Q Aufgenommene induktive Blindleistung.
Bemerkung: Die Gebiete, in denen kein stabiler Lauf möglich ist, sind schraffiert.

Belastung mit dem Kurzschlußstrom und kann in Serieschaltung noch kleinere Blindleistungen aufnehmen als die Synchronmaschine. Immerhin ist auch die asynchrone Seriemaschine nicht imstande, Blindleistung abzugeben, d. h. als Kapazität zu wirken, ohne dass sie mit einer Parallelmaschine gekuppelt wird. Die etwas günstigeren Stabilitätsverhältnisse der Asynchronmaschinen lassen es aber als angezeigt erscheinen, von Fall zu Fall zu untersuchen, welche Lösung wirtschaftlich vorteilhafter ist.

5. *Andere Möglichkeiten zur Erweiterung der Stabilitätsgrenzen.*

Man könnte daran denken, die Uebertragung überhaupt asynchron durchzuführen, also im Kraftwerk Asynchron-Generatoren aufzustellen und nur am andern Ende der Leitung ein synchron betriebenes Netz anzuschliessen. Obwohl hier ein Aussertrittfallen wie bei Synchronmaschinen nicht möglich ist, wird selbstverständlich durch die Verwendung von Asynchron-Generatoren das Stabilitätsproblem nicht einfach aus der Welt geschafft, sondern muss im Gegenteil ganz gründlich studiert werden.

Wenn man in der Fig. 17 zunächst nur die ausgezogenen Kreise betrachtet, so sieht man links aussen den Leistungskreis der gewöhnlichen Asynchronmaschine, wobei die abgegebene Blindleistung nach oben, die abgegebene Wirkleistung nach links aufgetragen ist. Es wurde angenommen, dass die Maschine 25 % Magnetisierungsstrom und 25 % Kurzschlußspannung hat und dass ihre Nennleistung mit der natürlichen Leistung einer langen Leitung, an die sie angeschlossen ist, übereinstimmt. Diese Leitung sei am andern Ende mit einem sehr starken Netz verbunden. Die beiden weitern ausgezogenen Kreise gelten nun für die Leistung, die in dieses Netz geliefert wird, bei einer Leitungslänge von 1000, resp. 2000 km. Die Leistungsübertragung erfolgt nur für ein Viertel jedes Kreises stabil und in der gewünschten Richtung (vom Asynchron-Generator zum Netz). Dieses Viertel ist besonders dick gezeichnet.

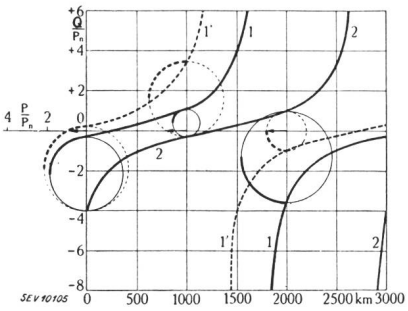

Fig. 17.
Verhalten eines Asynchrongenerators, der Leistung über eine lange Leitung in ein sehr starkes Netz liefert.
Ausgezogene Kreise: Leistungskreise bei Verwendung einer normalen Asynchronmaschine, für die Leitungslängen 0, 1000 bzw. 2000 km.
Gestrichelte Kreise: Dasselbe bei Verwendung einer derart kompensierten Asynchronmaschine, dass beim Schlupf Null die Wirkleistung Null ist und bei Abgabe der natürlichen Leistung keine Blindleistung abgegeben wird.
Die Kurven *1*, *1'* und *2* geben die Lage der äussersten Punkte der Leistungskreise in Funktion der Leitungslänge an, und zwar
Kurve *1* für Schlupf Null bei unkompensierter Asynchronmaschine;
Kurve *1'* für Schlupf Null bei kompensierter Asynchronmaschine;
Kurve *2* für Schlupf ∞ in beiden Fällen.
P Vom Asynchron-Generator abgegebene Wirkleistung. Q Desgleichen Blindleistung. P_n Nennleistung des Asynchron-Generators (gleich der natürlichen Leistung der angeschlossenen langen Leitung angenommen).

Die ausgezogenen Kurven *1* und *2* geben in Abhängigkeit von der Leitungslänge die Lage der äussersten Punkte der Leistungskreise an: für eine bestimmte Leitungslänge braucht man nur eine Vertikale durch den entsprechenden Punkt zu ziehen und den Kreis durch die Schnittpunkte dieser Geraden mit den beiden Kurven zu legen. Kurve *1* gibt den Punkt für den Schlupf Null, Kurve *2* für den Schlupf ∞ an.

Der vertikale Abstand der beiden Kurven ist gleich dem Durchmesser des Kreises und somit ein Mass für die maximal übertragbare Leistung. Diese nimmt mit wachsender Leitungslänge anfänglich ab, nachher aber wieder zu und erreicht an gewissen Stellen sehr hohe Werte. Das ist ganz ähnlich wie bei der synchronen Leistungsübertragung. Auch dort ist die Uebertragung grundsätzlich bei jeder Leitungslänge möglich; die übertragbare Leistung nimmt mit wachsender Leitungslänge zunächst ab, ohne je Null zu werden und nimmt nachher wieder zu.

Eine gewöhnliche Asynchronmaschine ist nicht imstande, die Leitung mit ihrer natürlichen Leistung zu beliefern, da sie bekanntlich in jedem Betriebszustand Blindleistung aufnimmt. Um die Leitung mit natürlicher Leistung betreiben zu können, muss daher dem Asynchron-Generator eine

Spannung im Rotor zugeführt werden. Zieht man zunächst nur Rotorspannungen von solcher Phasenlage in Betracht, dass beim Schlupf Null die Wirkleistung Null bleibt, so entsprechen die gestrichelt gezeichneten Kreise derjenigen Rotorspannung, die für die Lieferung der natürlichen Leistung erforderlich ist. Der Betriebspunkt der natürlichen Leistung ist in Fig. 17 durch horizontal nach links gerichtete Vektoren von der Länge 1 gekennzeichnet. Bei der Leitungslänge Null ist dieser Betriebszustand natürlich stabil (der Arbeitspunkt liegt auf dem dick gezeichneten Teil des Kreises), bei 1000 km Leitungslänge ist er dagegen unstabil, die natürliche Leistung kann also tatsächlich nicht übertragen werden. Diese Uebertragung ist nur möglich bis zu einer Leitungslänge von etwa 500 km und dann wieder oberhalb 2000 km.

Zieht man jedoch Rotorspannungen beliebiger Phasenlage in Betracht, so gibt es bei jeder Leitungslänge unendlich viele Leistungskreise für die natürliche Leistung, und ein Teil davon ermöglicht die stabile Uebertragung. Es konnten natürlich nicht alle diese Kreise in die Figur eingetragen werden; wir müssen uns mit der Angabe begnügen, dass z. B. bei 1000 km Leitungslänge die Uebertragung der natürlichen Leistung tatsächlich möglich ist. Das ist nun ein ganz bedeutender Unterschied gegenüber der synchronen Uebertragung der natürlichen Leistung, die bei so grossen Distanzen nicht ohne Kompensation der Leistung durchgeführt werden kann.

Selbstverständlich ist das Problem der asynchronen Uebertragung noch nicht gelöst, wenn die Stabilität gewährleistet ist. Da der asynchrone Betrieb eine vollständige Umwälzung bedeutet, ist noch eine Unmenge anderer Fragen abzuklären. Auf all das können wir hier natürlich nicht eingehen. Ich wollte nur auf die Möglichkeit der asynchronen Uebertragung aufmerksam machen und zeigen, dass einerseits die Stabilitätsuntersuchungen auch hier recht kompliziert sind, dass aber anderseits wesentliche Vorteile gegenüber der synchronen Uebertragung zu erwarten sind.

Ausser dem asynchronen Betrieb bestehen hauptsächlich noch 2 Möglichkeiten zur Stabilitätsverbesserung bei der Drehstromübertragung: Wahl einer kleinern Frequenz als 50 Hz oder Wahl einer so hohen Frequenz, dass die Leitung als sog. Halbwellenleitung betrieben werden kann.

Dass eine kleinere Frequenz die Stabilität verbessert, leuchtet ohne weiteres ein. Wir erinnern uns, dass der Winkel Φ, die Phasenverschiebung zwischen der Spannung am Anfang und Ende der Leitung bei Uebertragung der natürlichen Leistung, nicht nur der Leitungslänge, sondern auch der Frequenz proportional ist. Die Wahl einer kleinern Frequenz ermöglicht es daher, dass die zulässige Grenze dieser Phasenverschiebung erst bei grösserer Leitungslänge erreicht wird.

Wir erinnern uns aber auch, dass die dynamisch stabile Uebertragung der natürlichen Leistung nicht nur über relativ kurze Distanzen (bis ca. 400 km) möglich ist, sondern ausserdem über bedeutend grössere Entfernungen, nämlich über Leitungslängen, deren Wert Φ in der Nähe von 180° liegt. Bei der Normalfrequenz 50 Hz gehört dazu eine Distanz von 3000 km. Durch Wahl einer höhern Frequenz kann jedoch für jede Leitungslänge unterhalb 3000 km erreicht werden, dass der Winkel Φ gerade 180° wird.

Ich glaube aber kaum, dass eine dieser Möglichkeiten als allgemeine Lösung in Frage kommt. Bei einer kleinern Frequenz als der normalen werden die Maschinen und Transformatoren teurer, so dass einer Frequenzverkleinerung aus wirtschaftlichen Gründen enge Grenzen gesetzt sind. Eine höhere Frequenz kann zwar in dieser Beziehung unter Umständen sogar vorteilhaft sein; dafür hat die Halbwellenleitung den Nachteil, dass keine beliebigen Abzweigungen zulässig sind. Der Hauptnachteil beider Methoden ist aber der, dass am Ende der Uebertragung eine Frequenzumformung nötig ist. Dann ist es wohl günstiger, unmittelbar zur Gleichstromübertragung überzugehen. Denn der wichtigste Vorteil der *normalen* Drehstromübertragung besteht ja gerade darin, dass die Energie an jeder Stelle ohne Umformung mit der gewünschten Frequenz zur Verfügung steht.

IV. Schlussfolgerungen

Beim Isolationsproblem steht gegenwärtig die Frage der Nullpunktserdung im Vordergrund. Sie beschäftigt die Fachleute schon seit mehr als 20 Jahren, ohne dass sie jemals eindeutig für oder gegen die Löschspule entschieden worden wäre. Heute ist sie von neuem aktuell, weil in Höchstspannungsnetzen die Verwendung von Löschspulen aus verschiedenen Gründen beträchtlich teurer ist als die direkte Nullpunktserdung. Es dürfte in erster Linie von den Betriebserfahrungen mit der Methode der raschen Wiedereinschaltung in Höchstspannungsnetzen abhängen, ob sich die Löschspule auch in diesem Gebiet behaupten kann oder nicht. Wenn es mit jener Methode gelingt, in einem direkt geerdeten Netz praktisch die gleiche Betriebssicherheit zu erreichen wie in einem gelöschten, so ist kein Grund vorhanden, die teurere Lösung mit der Löschspule zu wählen.

Was das Stabilitätsproblem anbelangt, lässt es sich beherrschen durch vollständige oder — wirtschaftlicher — teilweise Kompensation der Leitungs-Induktivität und -Kapazität. Die Kompensation kann durch Querdrosselspulen und Seriekondensatoren oder durch rotierende Maschinen verwirklicht werden. Die zweite Lösung ist etwas teurer, hat aber gewisse technische Vorteile; vor allem wird die Stabilität günstig beeinflusst, wenn starke Netze, die im Zuge einer Hochleistungsübertragung liegen, an diese angeschlossen werden.

Eine interessante Lösung des Stabilitätsproblems ist die asynchrone Uebertragung, bei der im Kraftwerk lauter Asynchron-Generatoren aufgestellt werden und nur das Netz am andern Ende der langen Leitung in normaler Weise synchron betrieben wird.

Auf diese Art ist die stabile Uebertragung der natürlichen Leistung ohne Kompensation der Leitung auch noch über Distanzen möglich, bei denen die synchrone Uebertragung nicht ohne Kompensation auskommt. Allerdings sind noch viele Schwierigkeiten zu überwinden, bis eine asynchrone Höchstleistungsübertragung praktisch verwirklicht werden kann.

Wichtiger als alle diese Detailfragen ist jedoch die Tatsache, dass die Drehstromübertragung vom technischen Standpunkt aus über praktisch beliebige Distanzen möglich ist. Ob die Höchstleistungsübertragungen der nächsten Zukunft mit Gleichstrom oder mit Drehstrom ausgeführt werden, wird daher hauptsächlich von der technischen Entwicklung der Gleichstromübertragung und von der Wirtschaftlichkeit beider Systeme abhängen.

(Fortsetzung des Berichtes folgt.)

Praktische Bestimmung des Leistungsfaktors elektrischer Anlagen

Von *Hermann Kull*, Olten

621.3.018.14

Einleitend wird die Berechnung des Leistungsfaktors aus den Angaben des Wirk- und Blindverbrauchzählers behandelt und anschliessend ein Ueberschuss-Blindverbrauchzähler beschrieben, der in Anlagen von Grossbezügern elektrischer Energie, für welche ein Mindestwert des Leistungsfaktors festgelegt ist, gute Dienste leistet.

L'auteur considère le calcul du facteur de puissance basé sur les indications des compteurs d'énergie active et réactive, puis il décrit un compteur totalisant les dépassements d'énergie réactive, destiné aux installations de grands consommateurs d'énergie électrique, pour lesquelles un facteur de puissance minimum est prescrit.

Um die Blindleistung, welche die Erzeugungs- und Weiterleitungsorgane der elektrischen Energie wattlos belastet, in zulässigen Grenzen zu halten, sehen sich die Elektrizitätswerke veranlasst, Tarifbestimmungen aufzustellen, nach denen die Energiebezüger gehalten sind, den mittleren Leistungsfaktor ihrer Anlagen durch den Einbau geeigneter Mittel über einem vertraglich festgesetzten Wert zu halten oder den diesen Wert überschreitenden Verbrauch von Blindarbeit zu vergüten. Es sollte deshalb der Energiebezüger jederzeit über die ungefähre Grösse des Leistungsfaktors und über den Stand des Blindverbrauches seiner Anlage unterrichtet sein.

Im allgemeinen besitzt der Leistungsfaktor einen stark schwankenden Wert. Die Erfassung der Spitzenwerte bietet kein Interesse, dagegen die Kenntnis des kurzzeitigen Mittelwertes und des Mittelwertes einer Mess- oder Verrechnungsperiode. Es wird deshalb allgemein von der Verwendung direktzeigender und registrierender cos φ-Messer Umgang genommen, und man beschränkt sich auf den Einbau von Blindverbrauchzählern. Aus den Umlaufgeschwindigkeiten des Wirk- und des Blindverbrauchzählers lässt sich der kurzzeitige Mittelwert des Leistungsfaktors folgendermassen rechnerisch bestimmen:

Für den Wirkverbrauchzähler sei

W der Wirkverbrauch in kWh in der Zeit t,
n die Umdrehungszahl in der Zeiteinheit,
k die Anzahl kWh, die einer Umdrehung entsprechen;

dann ist für Dreiphasenenergie

$$W = U\,I \cos\varphi\, t \sqrt{3} = n\,k\,t \qquad (1)$$

Für den Blindverbrauchzähler sei

B der Blindverbrauch in kVarh in der Zeit t,
n_1 die Umdrehungszahl in der Zeiteinheit,
k_1 die Anzahl kVarh, die einer Umdrehung entsprechen;

dann ist für Dreiphasenenergie

$$B = U\,I \sin\varphi\, t \sqrt{3} = n_1\,k_1\,t \qquad (2)$$

Aus der Division der Gleichungen (1) und (2) ergibt sich

$$\cos\varphi = \sqrt{\frac{1}{1+\left(\frac{n_1}{n}\right)^2\cdot\left(\frac{k_1}{k}\right)^2}} \qquad (3)$$

$\frac{k_1}{k}$ ist für ein und dieselbe Zählergruppe eine konstante Grösse; gewöhnlich wird $k_1 = k$ gewählt. In vielen Fällen ist es vorteilhaft, an Stelle der Umdrehungszahlen in der Zeiteinheit, die Zeiten z und z_1 pro Umdrehung mit Stoppuhren zu bestimmen. In diesem Falle beträgt

$$\cos\varphi = \sqrt{\frac{1}{1+\left(\frac{z}{z_1}\right)^2\cdot\left(\frac{k_1}{k}\right)^2}} \qquad (4)$$

Durch Ausführung einiger Messungen erhält man den kurzzeitigen Mittelwert des Leistungsfaktors mit genügender Genauigkeit.

Der Mittelwert des Leistungsfaktors aus den Angaben des Wirk- und des Blindverbrauchzählers während einer Mess- oder Verrechnungsperiode beträgt:

$$\cos\varphi = \sqrt{\frac{1}{1+\left(\frac{B}{W}\right)^2}} \qquad (5)$$

Diese Werte von cos φ lassen sich mit dem Rechenschieber leicht und mit genügender Genauigkeit ermitteln.

Es sei cos α der mit dem Energielieferanten vereinbarte Leistungsfaktor und D der Mehr- oder Minderverbrauch von kVarh, entsprechend diesem Leistungsfaktor, dann beträgt, wenn

a) $\cos\varphi < \cos\alpha$, der zu bezahlende Blindverbrauch

$$D = B - W\cdot \mathrm{tg}\,\alpha, \qquad (6)$$

b) $\cos\varphi > \cos\alpha$, der Minderverbrauch

$$D = W\cdot \mathrm{tg}\,\alpha - B. \qquad (7)$$

Der Ueberschuss-Blindverbrauchzähler

Der eingangs erwähnte Blindverbrauchzähler misst die Blindenergie bei Phasenverschiebungswinkeln über 0° und steht bei cos $\varphi = 1$ still. Wird