Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke

Band: 45 (1954)

Heft: 17

Artikel: Die Flugbahn der Wassertropfen bei der künstlichen Beregnung von Isolatoren

Autor: Kläy, H.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-1061191

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: 12.12.2025

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

45. Jahrgang Nr. 17 Samstag, 21. August 1954

BULLETIN

DES SCHWEIZERISCHEN ELEKTROTECHNISCHEN VEREINS

GEMEINSAMES PUBLIKATIONSORGAN
DES SCHWEIZERISCHEN ELEKTROTECHNISCHEN VEREINS (SEV) UND
DES VERBANDES SCHWEIZERISCHER ELEKTRIZITÄTSWERKE (VSE)

Die Flugbahn der Wassertropfen bei der künstlichen Beregnung von Isolatoren

Von *H. Kläy*, Langenthal

621.317.32 : 621.647.2 : 532.525

Bei Beregnungsversuchen kann beobachtet werden, wie der Wassereinfall auf das Prüfobjekt beim Einschalten der Spannung verändert wird. Die Flugbahn der Wassertropfen wird berechnet, und es folgt daraus die Notwendigkeit, dass der Regen bei Spannung am Prüfobjekt nachkontrolliert werden muss.

Lors des essais on peut constater que la pluie artificielle est influencée par le champ électrique. La trajectoire de la goutelette d'eau est calculée et il s'en suit, que le contrôle de la pluie devrait être fait sous tension.

Für die Prüfung von Freiluftisolatoren wird ein unter ca. 45° einfallender Regen einer gewissen Intensität und Leitfähigkeit vorgeschrieben. Dieser schief einfallende Regen wird meistens dadurch erhalten, dass aus horizontal oder leicht schief gestellten Düsen Wasser unter 1,0 ... 2,0 kg/cm² Druck ausgespritzt wird. Kurz nach Verlassen der Düse löst sich der zusammenhängende Wasserstrahl in *einzelne Tropfen verschiedener Grösse auf* (Fig. 1 und 2). Die Flugbahn dieser Tropfen kann berechnet werden, wenn die an ihnen angreifenden Kräfte bekannt sind. Vorerst sei nur der Einfluss der Schwerkraft und der Luftreibung betrachtet.

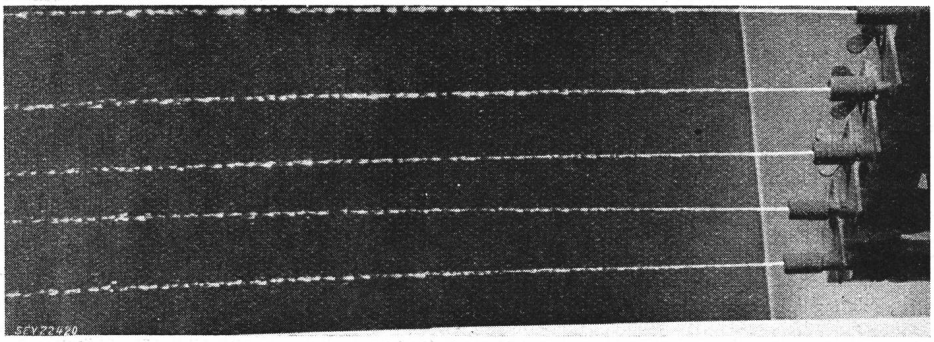

Fig. 1
Auflösung des Strahles in einzelne Tropfen
Kurz nach Verlassen der Düse bilden sich die Tropfen, und nach einem Weg von ca. 50 cm fallen schon die kleinsten aus. Die Geschwindigkeit ist aus der mehr oder weniger langen belichteten Bahn abzuschätzen. Belichtungszeit mit Elektronenblitz ca. $^1/_{10\,000}$ S

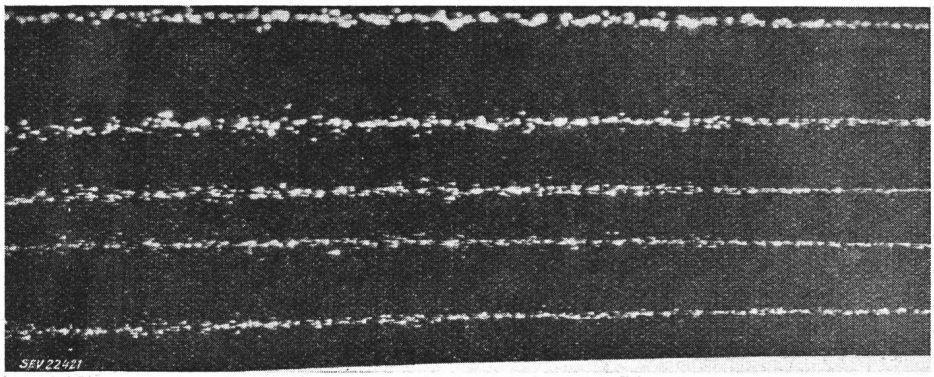

Fig. 2
Bild des Wasserstrahles ca. 50 cm nach Verlassen der Düsen
Wasserdruck p = 1,5 kg/cm²

Im Prüffeld hat sich gezeigt, dass der Strahlverlauf sich beim Einschalten der Hochspannung ändert. Daraus muss geschlossen werden, dass auch das elektrische Feld einen Einfluss ausübt.

Auf einen Wassertropfen, der kugelförmig mit dem Durchmesser d angenommen sei, wirkt senkrecht nach unten die Schwerkraft $m\,g$ = konstant und entgegengesetzt der Geschwindigkeit die Luftreibung $W = -a\,v^2$. v ist dabei die Relativgeschwindigkeit des Tropfens zu der umgebenden

Luft. Da durch den Wasserstrahl die Luft z. T. mitgerissen wird, ist diese Relativgeschwindigkeit kleiner als die Teilchengeschwindigkeit im Raume. Da die vorliegenden Betrachtungen nur ein angenähertes Bild vermitteln sollen, kann zur einfacheren Berechnung für v die Geschwindigkeit im Raume eingesetzt werden. Zur weiteren Erleichterung seien die Horizontalbewegung und die durch die Schwerkraft bewirkte Vertikalbewegung gesondert betrachtet. Es wird nachher gezeigt, dass dadurch kein grosser Fehler gemacht wird.

Durch die *Schwerkraft* $m\,g$ und die senkrecht nach oben wirkende Widerstandskraft der Luftreibung fallen die Tropfen mit einer Geschwindigkeit, welche sich nach *Hütte I.*, 24. Aufl., S. 305, berechnet zu:

$$v = K \cdot \sqrt{1 - e^{-\frac{2\,g\,h}{K^2}}}$$

Die Fallzeit t für eine Fallhöhe h berechnet sich zu:

$$t = \frac{K}{g} \operatorname{arcosh} e^{\frac{gh}{K^2}}$$

worin

$$K = \sqrt{\frac{2\,g\,G}{\Psi\,\gamma\,F}}$$

Für eine Wasserkugel vom Durchmesser d wird

$$G = d^3 \frac{\pi}{6} \gamma_2$$

d Durchmesser in m
$\gamma_2 = 1000$ kg/m³
$\Psi = 0{,}5$ (Kugel)
$\gamma = 1{,}3$ kg/m³, spezifisches Gewicht der Luft
$F = d^2 \frac{\pi}{4}$
$g = 9{,}81$ m/s², Erdbeschleunigung

Damit ergibt sich:

$$K = 4{,}5 \sqrt{d} \qquad (d \text{ in mm})$$

Die Fallzeit für 1 m Höhe unter Berücksichtigung des Luftwiderstandes für Wassertropfen vom Durchmesser d ist in Tabelle I angegeben.

Fallzeit t in Funktion des Tropfendurchmessers d bei Fallhöhe h = 1 m

Tabelle I

d	mm	0,1	0,5	1,0	3,0
t	s	>0,7	0,52	0,49	0,44

Aus der Tabelle geht hervor, dass die verschieden grossen Tropfen die Höhe von 1 m in etwa 0,5 s durchfallen, d. h. ohne grossen Zeitunterschied. Dies rührt davon her, dass der Luftwiderstand bei der kleinen Geschwindigkeit nur bei ganz kleinen Tropfen (Nebel) bemerkbar wird. Ohne Luftwiderstand wäre die Fallzeit für 1m 0,451 s.

Es kann noch interessieren, mit welcher Geschwindigkeit frei fallende Regentropfen auftreffen. Bei dieser Grenzgeschwindigkeit ist die Luftreibung gleich gross wie das Gewicht des Tropfens. Sie beträgt nach Hütte:

$$v_{max} = K = \sqrt{\frac{2\,g\,G}{\Psi\,\gamma\,F}} = 4{,}5 \sqrt{d} \quad \text{m/s}$$

In der Formel ist wiederum d in mm einzusetzen. Tabelle II zeigt Werte der Grenzgeschwindigkeit v_{max} frei fallender Regentropfen von verschiedenem Tropfendurchmesser d. Es wird später gezeigt, dass bei der künstlichen Beregnung die Tropfen etwa mit der gleichen Geschwindigkeit auf die Isolatoren aufprallen.

Grenzgeschwindigkeit v_{max} frei fallender Regentropfen von verschiedenem Tropfendurchmesser d

Tabelle II

d	mm	0,1	0,5	1,0	3,0
v_{max}	m/s	1,42	3,2	4,5	7,8

Unter der Voraussetzung, dass der Wasserstrahl horizontal aus den Düsen austritt, sei nun die Wurfweite der einzelnen Wassertropfen berechnet. Die Anfangsgeschwindigkeit v_0 beträgt:

$$v_0 = \sqrt{2\,g\,H}$$

wobei $H = 10$ m Wassersäule angenommen werden soll. Bei Vernachlässigung des Druckverlustes im Düsenkanal ergibt sich

$$v_0 = \sqrt{196} = 14 \text{ m/s}$$

Die Bewegungsgleichung ergibt:

$$m \frac{d^2 s}{dt^2} = -a \left(\frac{ds}{dt}\right)^2$$

$$\frac{d^2 s}{dt^2} = -\frac{a}{m} \left(\frac{ds}{dt}\right)^2$$

Durch Reihenentwicklung erhält man:

$$\underline{s = \frac{m}{a} \ln \left(1 + \frac{a}{m} v_0\, t\right)}$$

wobei

$$a = \frac{\Psi\,\gamma\,F}{2\,g}$$

In Tabelle III ist zusammengestellt, welchen Weg s Tropfen von verschiedenem Durchmesser d nach einer Zeit $t = 0{,}5$ s zurückgelegt haben.

Weg s, welchen Tropfen von verschiedenem Durchmesser d in der Zeit t = 0,5 s nach Austritt aus der Düse zurückgelegt haben

Tabelle III

d	mm	0,1	0,5	1,0	2,0	3,0
s	m	0,72	2,08	3,0	4,06	4,62

Die Fallhöhe der Tropfen von 0,5 ... 3 mm Durchmesser ist nach 0,5 s etwa 1 m. Somit ist der Ort der Tropfen nach 0,5 s bekannt. Ausserdem können die horizontale und die vertikale Geschwindigkeitskomponente berechnet werden. Nach 0,5 s betragen die einzelnen *Geschwindigkeitskomponenten* der verschieden grossen Tropfen:

$$v_h = \frac{v_0}{1 + \frac{a}{m} v_0\, t}$$

$$v_v = K\sqrt{1 - e^{-\frac{2gh}{K^2}}}$$

Aus den Bedingungen:

$$t = 0{,}5 \text{ s} \qquad h \approx 1 \text{ m} \qquad K = 4{,}5\sqrt{d}$$

$$v_0 = 14 \text{ m/s} \qquad \frac{a}{m} = \frac{0{,}5}{d}$$

$$\frac{2gh}{K^2} \approx \frac{1}{d}$$

errechnet sich:

$$v_h = \frac{14}{1 + \frac{7}{d}} \qquad v_v = 4{,}5\sqrt{d\left(1 - e^{-\frac{1}{d}}\right)}$$

Die Geschwindigkeit verschieden grosser Tropfen, 0,5 s nach Austritt aus der Düse, ist in Tabelle IV angegeben und in Fig. 3 dargestellt.

Geschwindigkeit verschieden grosser Tropfen, 0,5 s nach Austritt aus der Düse

Tabelle IV

d	mm	0,5	1,0	3,0
v_h	m/s	0,93	1,75	4,2
v_v	m/s	2,95	3,58	4,13
α		72° 30′	64°	44° 30′
v	m/s	3,12	3,98	5,9

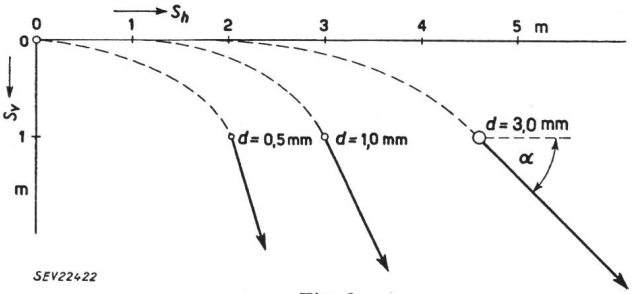

Fig. 3
Geschwindigkeit verschieden grosser Tropfen, 0,5 s nach Austritt aus der Düse

s_h in horizontaler Richtung zurückgelegter Weg
s_v in vertikaler Richtung zurückgelegter Weg
d Tropfendurchmesser
α Einfallwinkel

Aus der maximalen Reichweite des Düsenstrahles kann auf die maximale Tropfengrösse geschlossen werden. Sie beträgt für 0,5 mm Düsendurchmesser bei 10 m Wassersäule 4,2 m und 1 m Fallhöhe. *Somit haben die grössten Tropfen einen Durchmesser von 2 mm.*

Wie eingangs festgestellt wurde, sollte zur Berechnung des Luftwiderstandes die Relativgeschwindigkeit v verwendet werden. Statt dessen wurde mit der Geschwindigkeit im Raume gerechnet. Für Tropfen im Hauptstrahl ist der Luftwiderstand kleiner als berechnet — die Flugweite also grösser — weil die Luft z. T. mitgerissen wird. Durch den Luftwiderstand wird der Strahl aussortiert. Die grossen Tropfen fliegen am weitesten, die kleineren fallen je nach Grösse vorher aus (Fig. 3).

Bei Einschalten der Prüfspannung kann man nun beobachten, wie der Strahl wieder gebündelt wird (Fig. 5). Der nach unten fallende Schleier verschwindet zum Teil und zudem wird der Strahl gehoben und reicht weiter. Aus dieser Erscheinung ist

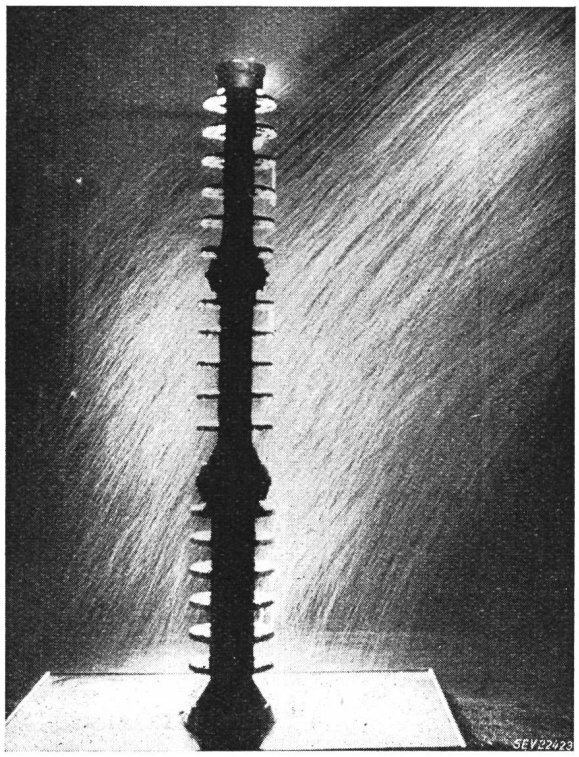

Fig. 4
Beregnung einer 2,2 m hohen Isolatorsäule bei Prüfspannung null
Belichtung 1/25 s

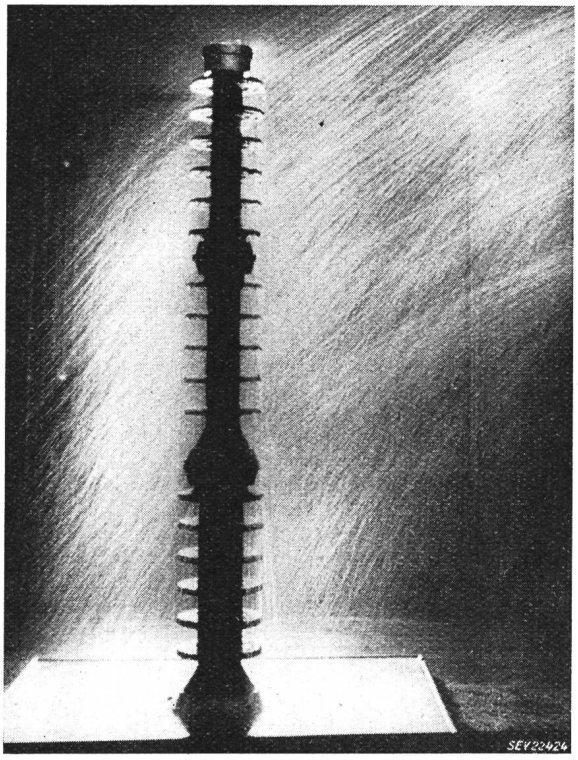

Fig. 5
Beregnung der in Fig. 4 gezeigten, 2,2 m hohen Isolatorsäule bei Prüfspannung 500 kV
Der Strahl wird gehoben

zu schliessen, dass unter dem *Einfluss des elektrischen Feldes*, welches zwischen dem beregneten Prüfobjekt und den geerdeten Wasserdüsen bei der Spannungsprüfung auftritt, die Auflösung in Tropfen anders vor sich geht als ohne Spannung. Es ist so, als ob *grössere Tropfen* entstehen würden. Obschon durch die Abschirmnetze der Beregnungsanlage die ersten 60 cm des Strahles geschützt sind, kann nachher eine Zusammenballung stattfinden. Es ist aber nicht möglich, durch eine genügend weit vorgetriebene Abschirmung den Einfluss der Spannung auszuschalten, weil dadurch die Schlagweite gegen das Prüfobjekt zu klein würde. Man muss sich mit diesem störenden Einfluss dadurch abfinden, dass die Kontrolle der einfallenden Regenmenge am Prüfobjekt *unter Spannung* vorgenommen wird. Dazu muss das Regen-Messgefäss vor dem Prüfobjekt isoliert befestigt werden. Dann ist unter Spannung lange genug zu messen, so dass die spannungslose Zeit nicht ins Gewicht fällt. Einige grundlegende Messungen ohne und mit Spannung werden den Einfluss der Spannung zeigen; dieser ist von der allgemeinen Anordnung der Elektroden abhängig und daher von Prüffeld zu Prüffeld verschieden.

Ausser der «Hebung» des Strahles findet unter Spannung durch die Konzentrierung eine ungleichförmigere Beregnung des Prüfobjektes statt. Auch diese Erscheinung muss beobachtet werden, damit man reproduzierbare Werte bei den Regenprüfungen erhält. Die Wirkung des elektrischen Feldes, die Wassertropfen zusammenzuballen, ist eine allgemeine Erscheinung und muss bei jeder Regenprüfung beachtet werden.

Zur Überprüfung der Gleichmässigkeit der Beregnung wird ein geeignetes Messgefäss am Prüfobjekt befestigt und während genügend langer Zeit (ca. 5 min) unter Spannung die Regenmenge kontrolliert.

In Fig. 6 ist die Verteilung der Horizontalkomponente über eine Messhöhe von 2,4 m gezeigt. Das Messgefäss ist so unterteilt, dass von 5 zu 5 cm über 50 cm Höhe gleichzeitig gemessen werden kann.

Die Regen-Verteilung ohne und mit 500 kV Prüfspannung ist trotz den beschriebenen Abschirmgittern verschieden. Unter Spannung wird der Regen gehoben, und im obersten Gebiet wird die Horizontalkomponente deshalb bedeutend grösser. Doch ist es möglich, durch Kontrolle unter Spannung die gewünschte Regenmenge einzustellen. Wenn dieser Erscheinung noch die richtige Beachtung geschenkt wird, sollte es möglich sein, mit der vom SEV entwickelten Beregnungseinrichtung[1]) wirklich reproduzierbare Messungen durch zuführen. Auch mit anderen Beregnungseinrichtungen sollten übereinstimmende Messresultate erhalten werden können, wenn die Horizontalkomponente und die Leitfähigkeit den Vorschriften entsprechen, und auch die Tropfengrösse des Regens ähnlich ist.

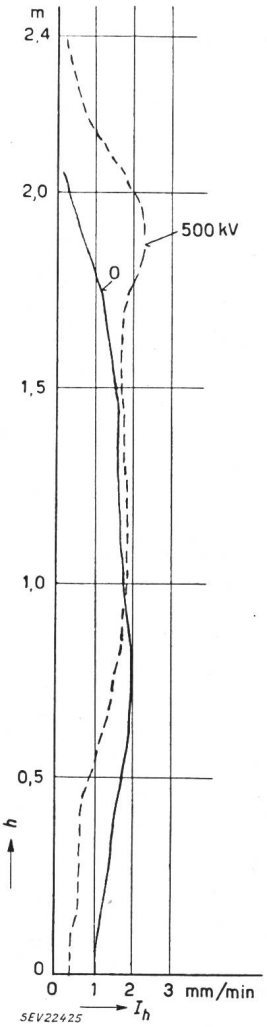

Fig. 6

Verteilung der Horizontalkomponente des Regens über eine Messhöhe von 2,4 m

h Messhöhe;
I_h Horizontalintensität

[1]) siehe «Die neue Kapillardüsen-Beregnungsanlage des SEV für Spannungsprüfungen und ihre Anwendung». Bull. SEV Bd. 45(1954), Nr. 14, S. 561...570.

Adresse des Autors:
Dr. sc. techn. *H. Kläy*, Dipl. Ing., Porzellanfabrik Langenthal A.-G., Langenthal (BE).

Zur Theorie der Spannungshaltung auf Höchstspannungsleitungen

Von *D. Oehler*, Zürich

621.315.051 : 621.316.722.1

In den folgenden Darlegungen wird zuerst eine kurze Beschreibung der theoretischen Grundlagen für Quer- und Längskompensation gegeben. Anschliessend wird an einem Beispiel gezeigt, dass der Ohmsche Widerstand auf die Erscheinungen der Spannungshaltung bei Querkompensation keinen prinzipiellen Einfluss hat, bei Längskompensation jedoch unbedingt berücksichtigt werden muss. Da keines der beiden Verfahren allein den Anforderungen der Praxis genügen dürfte, wird zum Schluss eine Kombination der beiden erwähnt, die erlaubt, grosse Übertragungsleistungen unter der Bedingung der Spannungshaltung stabil über lange Höchstspannungsleitungen zu transportieren.

L'exposé suivant traite d'abord des bases théoriques de la compensation en parallèle et en série. Il montre ensuite par un exemple que la résistance ohmique n'a pas de principe une influence sur le maintien de la tension d'une ligne compensée en parallèle, mais qu'il faut par contre absolument en tenir compte lors de la compensation en série. Comme ni l'un ni l'autre des deux procédés satisfait aux exigences de l'exploitation pratique, l'article finit par indiquer une combination des deux procédés, permettant la transmission de très grandes puissances sur des lignes à très haute tension d'une manière satisfaisante du point de vue de la stabilité et du maintien de la tension.

An der Diskussionsversammlung des SEV vom 5. Dezember 1952 berichtete *A. Hauser* u. a. über die Hilfsmittel zur Erhaltung der Spannungskonstanz längs langer Starkstromleitungen im Fall des Betriebs mit über- bzw. unternatürlicher Leistung[1]). In seinen Deduktionen verzichtete er (wie allgemein üblich) auf die Berücksichtigung des Leitungswiderstandes. Nun ist bekannt, dass diese Vernachlässigung im Fall der Querkompensation keine grundsätzliche Abweichung vom Verhalten der ver-

[1]) siehe *Hauser, W.*: Spannungshaltung und Kurzschluss-Schutz im Betrieb mit 380-kV-Anlagen. Bull. SEV Bd. 44(1953), Nr. 4, S. 137...141.

lustbehafteten Leitung zur Folge hat. Nicht so bei Anwendung der Längskompensation. Hier stellt die verlustlose Leitung einen Sonderfall dar, der keine hinreichenden Schlüsse auf die wirklichen Verhältnisse zulässt.

Der Unterschied im Verhalten verlustloser und verlustbehafteter Leitungen bei Quer -und Längskompensation wurde unter der Leitung von *B. Bauer* an der Professur für angewandte Elektrotechnik und Energiewirtschaft untersucht. Im Anschluss an allgemeine theoretische Betrachtungen wurden die Verhältnisse der Lukmanier-Leitung für verschiedene Übertragungsdistanzen rechnerisch und experimentell näher betrachtet.

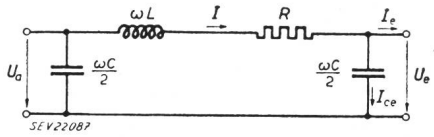

Fig 1
Ersatzbild einer Fernleitung

U_a, U_e Phasenspannungen am Anfang bzw. am Ende der Leitung;
R, L, $\frac{\omega C}{2}$ Betriebsimpedanzen;
I Strom durch die Längsimpedanzen R und ωL;
I_e Strom, der am Ende der Leitung abgegeben werden kann;
I_{ce} Strom durch die Querkapazität am Ende der Leitung.

Um in der Elektrotechnik Leitungen theoretisch und experimentell untersuchen zu können, werden sie bekanntlich als Π-Glieder mit konzentrierten Leitungsbelägen dargestellt (Fig. 1). Diese Nachbildung ist für unsere Zwecke genügend genau, sofern die Länge der Leitung den achten Teil ihrer Wellenlänge nicht überschreitet. Auch für die Drehstromleitungen gelten diese Beziehungen, wenn sie symmetrisch aufgebaut und belastet sind, sowie ihre Induktivitäten und Kapazitäten als Betriebsinduktivitäten und Betriebskapazitäten verstanden werden. Höchstspannungs-Freileitungen bis zu einer Länge von etwa 750 km dürfen somit durch ein Π-Glied reproduziert werden.

Bei den sehr erheblichen kilometrischen Erstellungskosten der Höchstspannungsleitungen ist man bestrebt, sie in der Wirkleistung voll auszunützen, d. h. sie vom Transport der von den Verbrauchernetzen verlangten Blindleistungen zu entlasten. Es entsteht daher beim Bezug von Wirkenergie über lange Höchstspannungsleitungen die Aufgabe, den zugehörigen Blindenergieanteil im Verbrauchsgebiet selbst zu erzeugen. Dieses Problem wird in den folgenden Darlegungen als gelöst betrachtet und darum $\cos \varphi_e = 1$ gesetzt.

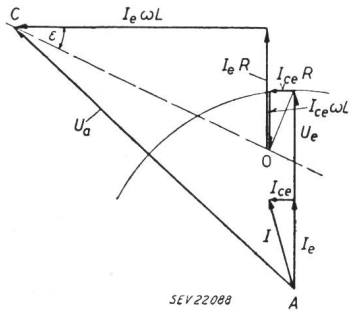

Fig. 2
Vektordiagramm einer Fernleitung entsprechend dem Ersatzbild in Fig. 1
$tg\ \varepsilon = R/\omega L$
Weitere Bezeichnungen siehe Fig. 1 und Text

Zunächst soll aus Fig. 1 das Vektordiagramm der Leitung (Fig. 2) entwickelt werden. Die Spannungsabfälle auf der Leitung, hervorgerufen vom Strom I_e, der am Ende der Leitung abgegeben wird, und vom Strom I_{ce}, der durch die Endkapazität fliesst, sind getrennt aufgetragen. Ihre Beträge zu U_e, der Spannung am Ende der Leitung, geometrisch addiert, ergibt die Anfangsspannung U_a. Für eine bestimmte Leitung mit einer konstanten Endspannung U_e sei in Funktion von I_e bzw. P_e der geometrische Ort der Spitze des Spannungsvektors U_a gesucht. (P_e ist die am Ende der Leitung abgegebene Wirkleistung.) Man hat zu beachten, dass die Spannungsabfälle, die von I_{ce} verursacht werden, von U_e abhängen, von I_e aber unabhängig – somit konstant – sind. Der gesuchte geometrische Ort ist, wie man aus Fig. 2 leicht ersieht, die gestrichelte Gerade $\overline{OC}$. Sie ist bestimmt durch den Punkt O und ihren Neigungswinkel ε zur Horizontalen ($tg\ \varepsilon = R/\omega L$); d. h. ihre Lage wird eindeutig festgelegt durch die Leitungskonstanten R, ωL, $\frac{\omega C_e}{2}$ und durch den Betrag der Spannung am Ende der Leitung.

Die Strecke $\overline{OC}$ entspricht einem bestimmten I_e bzw. P_e. Diese Gerade zeigt uns die bekannte Tatsache, dass für kleine Belastung (unternatürliche Leistung) der Leitung die Anfangsspannung kleiner ist als die Endspannung und für grosse Last (übernatürliche Leistung) umgekehrt die Anfangsspannung grösser wird als die Endspannung.

Wenn man bei der Leitung Spannungshaltung verlangt, so versteht man darunter, wie früher erwähnt, dass längs der Leitung eine konstante Spannung herrscht. Auf das Ersatzbild (Fig. 1) übertragen, heisst das, dass der Betrag von U_a gleich dem Betrag von U_e sei, bzw. dass die Spitze des Vektors U_a (Fig. 2) auf dem Kreis mit U_e als Radius liegt. Wir packen also das Problem so an, dass für ein bestimmtes nach Richtung und Betrag konstantes U_e das betragsmässig gleich grosse U_a gesucht wird.

Aus Fig. 2 erkennt man schon die Grundlagen der Massnahmen zur Spannungshaltung. Um bei unternatürlicher Leistung zur Spannungsgleichheit $U_a = U_e$ zu gelangen, kann man z. B. die Leitungskapazität künstlich verringern durch Einbau einer Querinduktivität am Leitungsende oder aber durch Vergrösserung des Winkels ε mittels Serieschaltung einer Längsinduktivität mit der Induktivität der Leitung. Bei übernatürlicher Leistung erhält man z. B. Spannungsgleichheit durch Zuschalten einer Querkapazität am Ende der Leitung oder durch Einfügen einer Längskapazität in den Leitungszug. Für eine bestimmte übertragene Leistung, die sog. natürliche Leistung, herrscht Spannungsgleichheit ohne künstlichen Eingriff. Im Vektordiagramm der Fig. 2 entspricht dies dem Schnittpunkt der Geraden $\overline{OC}$ mit dem Kreis vom Radius U_e.

a) Querkompensation

Schaltet man am Ende der Leitung parallel zur Kapazität eine Querreaktanz X_q zu, so kann die Kapazität je nach Bedarf vergrössert oder verkleinert werden (Fig. 3). Die Wirkungsweise dieser Querreaktanz kann am besten an Hand eines Bei-

spiels erklärt werden. Die Leitung sei im Leerlauf. In diesem Fall fliesst durch ihre Induktivität ωL und durch ihren Ohmschen Widerstand R nur der

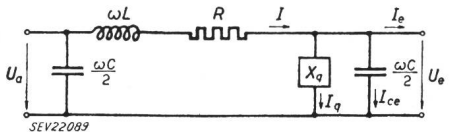

Fig. 3
Ersatzbild einer Fernleitung mit Querkompensation
X_q zusätzliche Querreaktanz zur Spannungshaltung
Weitere Bezeichnungen siehe Fig. 1, 2

Ladestrom der Endkapazität I_{ce}. Der so über der Leitung erzeugte Spannungsabfall verschiebt bei nach Richtung und Betrag konstant gehaltenen U_e die Spitze des Vektors U_a nach O (Fig. 2). Sofern eine induktive Querreaktanz X_q zugeschaltet wird, fliesst durch sie ein Strom I_q, der dem Strom I_{ce} entgegengesetzt gerichtet ist. Wird X_q in der Grösse so gewählt, dass I_q dem Betrag nach gleich I_{ce} ist, kompensieren sich die beiden, und über die Leitung fliesst kein Strom mehr. Es entsteht dann auch kein Spannungsabfall, und der Vektor U_a entspricht nach Richtung und Betrag dem Vektor U_e.

Wenn man die Voraussetzung macht, dass die Querreaktanz X_q — analog den Leitungskapazitäten — keinen Ohmschen Anteil besitze, ist der Strom I_q gleich oder entgegengesetzt I_{ce} gerichtet und steht damit senkrecht zum Strom I_e; bzw. die Spannungen $I_q\sqrt{R^2+\omega^2L^2}$ und $I_e\sqrt{R^2+\omega^2L^2}$ stehen unter einem rechten Winkel (Fig. 2). Man hat also mit einer Querreaktanz die Möglichkeit, die Gerade $\overline{OC}$ parallel zu sich selbst zu verschieben, bzw. die Spitze des Vektors U_a für jeden beliebigen Wert von P_e auf einer Senkrechten zur Geraden $\overline{OC}$ zu bewegen. Die Richtung dieser Verschiebung hängt davon ab, ob X_q induktiv oder kapazitiv gewählt wird; die Grösse der Verschiebung wird durch den Wert von X_q bestimmt. Vermittels einer Querreaktanz kann also die Spitze des Vektors U_a auf den Kreis mit U_e als Radius gebracht und damit die Spannungshaltung erreicht werden.

Multipliziert man im Spannungsdiagramm alle Strecken mit dem Faktor $U_e/\sqrt{R^2+\omega^2L^2}$, dann werden die Spannungen zu Leistungen:

$$I_e\sqrt{R^2+\omega^2L^2}\left(\frac{U_e}{\sqrt{R^2+\omega^2L^2}}\right)=P_e$$

$$I_q\sqrt{R^2+\omega^2L^2}\left(\frac{U_e}{\sqrt{R^2+\omega^2L^2}}\right)=Q_q$$

Q_q ist die in der Reaktanz X_q erzeugte, zur Spannungshaltung benötigte Blindleistung. Das so erhaltene Leistungsdiagramm ist in Fig. 4 dargestellt. Es entspricht dort die Strecke $\overline{OC_0}$ der natürlichen Leistung der Leitung (in der Π-Glied-Darstellung verstanden). Diese lässt sich auch unter Zuhilfenahme der analytischen Geometrie finden, indem die Koordinaten des Schnittpunkts der Geraden $\overline{OC}$ mit dem Kreis errechnet werden. Bei Anwendung der Querkompensation gibt es für jede Hochspannungsleitung eine maximal mögliche Übertragungsleistung, die nicht überschritten werden kann, wenn die Spannungshaltung noch gewährleistet wer-

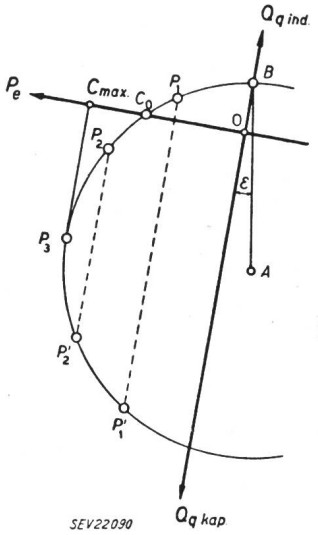

Fig. 4
Leistungsdiagramm bei Querkompensation
P_e am Ende der Leitung abgegebene Wirkleistung;
Q_q zur Spannungshaltung in der zusätzlichen Querreaktanz benötigte Blindleistung;
$\overline{OC}_{max}$ entspricht $P_{e\,max}$, der theoretisch grösstmöglichen Wirkleistung, die am Ende der Leitung abgegeben werden kann

den soll. In Fig. 4 entspricht sie der Strecke $\overline{OC}_{max}$ und beträgt für Drehstrom

$$P_{e\,max}=3\,U_e^2\,\frac{\sqrt{R^2+\omega^2L^2}-R}{R^2+\omega^2L^2}$$

Für den Fall der verlustlosen Leitung mit $R=0$ steigt sie auf

$$P_{e\,max\,(R=0)}=\frac{3\,U_e^2}{\omega L}$$

Im Bereich O bis C_{max} ergeben sich theoretisch für jede Leistung P_e jeweils zwei Lösungen für Q_q, und zwar:

von O bis C_0: ein induktives und ein kapazitives Q_q, den Punkten P_1 und P_1' in Fig. 4 entsprechend;
von C_0 bis C_{max}: zwei kapazitive Q_q, in Fig. 4 durch die Punkte P_2 und P_2' dargestellt.

In Berücksichtigung des Parallelbetriebs kommen nur Lösungen auf dem Kreisbogen von B bis P_3 in Frage, weil sich dabei kleinere Lastwinkel (bzw. kleinere Winkel zwischen U_a und U_e) einstellen (vgl. auch Fig. 6). Für den Fall $R=0$ ($\varepsilon=0$) fällt in Fig. 4 die Q_q-Achse mit $\overline{AB}$ zusammen, und die P_e-Achse steht senkrecht dazu. Die Blindleistung Q_q in Funktion von P_e aufgetragen stellt einen Kreis dar.

Um die Verbindung mit dem Aufsatz im Bulletin SEV 1953, Nr. 4 [1]), herzustellen, drehe man Fig. 4 im Punkt O um 180 °, denke $\varepsilon=0$ und so hat man die gleiche Darstellung für Q_q in Funktion von P_e.

Es sind für das Mastbild der Lukmanierleitung und für verschiedene Leitungslängen die entsprechenden Ersatzbilder gemäss Fig. 1 errechnet und in einem bestimmten Maßstab im Demonstrationsmodell abgebildet worden. Dort wurde experimentell und gleichzeitig rein rechnerisch die benötigte Blindleistung Q_q in Funktion der abgegebenen Leistung P_e für die verschiedenen Fälle ermittelt. Die Resultate sind in Fig. 5 aufgezeichnet. Die Kurven für $R=0$ sind natürlich nur errechnete Werte und können im Modell der Ohmschen Widerstände der

Drosselspulen wegen nicht gemessen werden. Der Unterschied zwischen verlustloser und verlustbehafteter Leitung ist aus den Kurven klar ersichtlich;

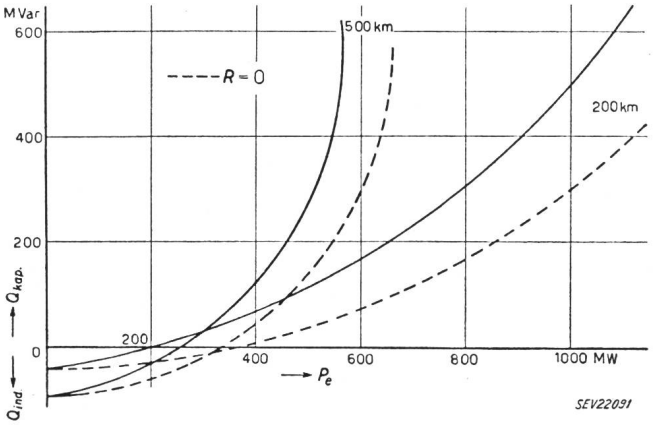

Fig. 5
Erforderliche Kompensationsblindleistung Q_q in Funktion der abgegebenen Wirkleistung P_e bei $\cos\varphi_e = 1$ für Leitungen mit Querkompensation
R Ohmscher Widerstand der betreffenden Leitung

ebenso der Einfluss der Leitungslänge auf den Blindleistungsbedarf Q_q. Die Darstellung für Q_q in Funktion von P_e wird prinzipiell nicht verändert, wenn zur Vereinfachung der Betrachtung der Ohmsche Widerstand R der Leitung vernachlässigt wird.

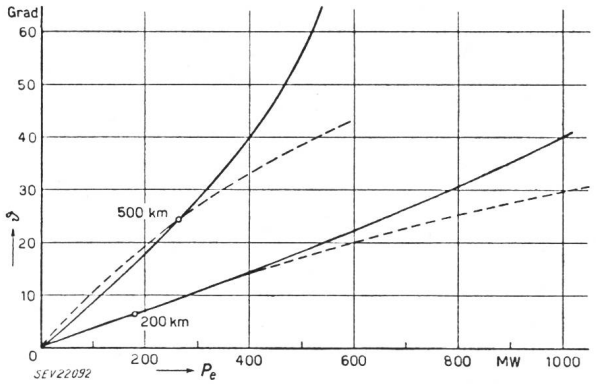

Fig. 6
Winkel ϑ zwischen Anfangs- und Endspannung in Funktion der abgegebenen Wirkleistung P_e bei $\cos\varphi_e = 1$ für Leitungen mit Querkompensation
---- unkompensierte Leitung ——— kompensierte Leitung

In Fig. 6 sind die Zwischenwinkel zwischen U_a und U_e in Funktion der Leistung P_e für unkompensierte und kompensierte Leitung dargestellt. Daraus lassen sich gewisse Anhaltspunkte für die Stabilität der Leitung feststellen.

b) Längskompensation

Es wird in Serie zur Induktivität der Leitung eine Längsreaktanz X_l geschaltet. Wie die Querreaktanz X_q soll sie keine Ohmsche Komponente enthalten und je nach Bedarf induktiv oder kapazitiv sein (Fig. 7). Der Einfluss der Reaktanz X_l auf die Anfangsspannung U_a ist im Vektordiagramm (Fig. 8) ersichtlich. Es ist ein beliebiger Belastungsfall eingezeichnet. Der Endpunkt der unkompensierten Anfangsspannung sei C. Man kann nun ein induktives X_l zuschalten, dadurch wird die Induktivität der Leitung grösser, und der Punkt C geht nach P_1 auf dem Kreisbogen, sofern die Grösse von X_l richtig gewählt wurde. Wenn X_l kapazitiv von entsprechender Grösse eingefügt wird, wandert C wegen verkleinerter Induktivität der Leitung nach P_1'. Es ist

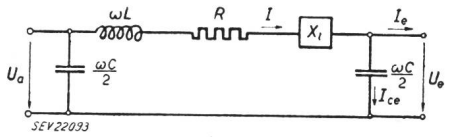

Fig. 7
Ersatzbild einer Fernleitung mit Längskompensation
X_e zusätzliche Längsreaktanz zur Spannungshaltung
Weitere Bezeichnungen siehe Fig. 1, 2

sehr schwer, in dieser geometrischen Darstellung den Überblick über die Verhältnisse bei veränderter Wirkleistung P_e zu gewinnen, da die Gerade $\overline{PP_{11}'}$ für jeden P_e-Wert in Bezug auf die OC-Gerade eine andere Lage einnimmt. Das Q_l/P_e-Diagramm lässt sich darum nur durch umfangreiche

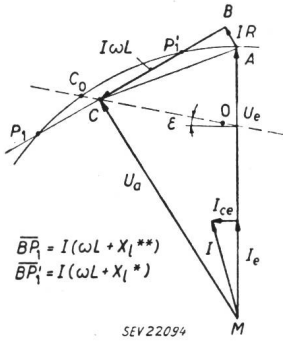

Fig. 8
Vektordiagramm einer Fernleitung mit Längskompensation entsprechend dem Ersatzbild in Fig. 7
X_e^* zusätzliche Längskapazität
X_e^{**} zusätzl. Längsinduktivität
Weitere Bezeichnungen siehe Fig. 1

Berechnung, durch punktweises Konstruieren aus dem Vektordiagramm oder durch Messung ermitteln (Q_l ist die in X_l verbrauchte Blindleistung). In analoger Weise wie für die Querkompensation sind die Resultate in Fig. 9 wiedergegeben. Wie bei der Querkompensation entspricht auch hier (Fig. 8) die Strecke $\overline{OC}$ der natürlichen Leistung der Leitung (als Π-Glied dargestellt). Diese findet sich in Fig. 9 als Schnittpunkt der Q_l-Kurve mit der P_e-Achse. Es existiert ebenfalls eine grösstmögliche Leistung, die unter der Bedingung der Spannungshaltung gerade noch über die Leitung übertragen werden kann. Sie ist erreicht, wenn in Fig. 8 die Gerade $\overline{BC}$ zur Tangente an den U_e-Kreis wird; bzw. in Fig. 9 steht dann die Tangente an die Q_l-Kurve senkrecht auf der P_e-Achse. Die Spannungshaltung ist also auch hier nur in einem bestimmten Bereich P_e möglich. Im Vergleich zur Querkompensation liegt bei Längskompensation die maximal übertragbare Leistung bei wesentlich geringeren Werten von P_e. Je nach Art der betreffenden Leitung ist die dabei zur Spannungshaltung benötigte Blindleistung in der Längsreaktanz induktiv oder kapazitiv.

Im kompensierbaren Bereich ergeben sich für jeden bestimmten Wert von P_e zwei mögliche Q_l-Werte. Sobald der sichere Parallelbetrieb über die Leitung berücksichtigt wird, fallen Lösungen mit induktiven Längsreaktanzen weg.

Für den Fall der verlustlosen Leitung ($R = 0$, $\varepsilon = 0$) fällt in Fig. 8 die Spannung IR weg und die Q_l-Kurven haben den in Fig. 9 gestrichelt gezeichneten Verlauf. Die obere Grenze des kompensier-

baren Leistungsbereichs wandert im Vergleich zu $R \neq 0$ ins ∞ ab, d. h. hier ist theoretisch für jeden Wert von P_e die Spannungshaltung möglich. Der obere gestrichelte Ast der Q_l-Kurven stellt den Fall $\omega L = 1/\omega C = X_l$ und damit die vollständig kompensierte Leitung dar. Der untere Teil der Q_l-Kurven entspricht der im Bulletin SEV 1953, Nr. 4 [1]), gezeigten Darstellung für Längskompensation.

Aus Fig. 9 ist klar ersichtlich, dass bei Längskompensation aus einer Untersuchung der verlustlosen Leitung keine Schlüsse auf deren wirkliches Verhalten gezogen werden dürfen. Um auch hier einen gewissen Einblick in die Stabilitätsverhältnisse der Leitung zu gewinnen, sind in Fig. 10 die Zwischenwinkel zwischen U_a und U_e in Funktion von P_e für unkompensierte und kompensierte Leitung aufgetragen.

Schlussfolgerungen

Als wesentlichste Erkenntnisse gelten:

Mittels Querkompensation ist es möglich, bis zu grossen Leistungen die Spannungshaltung zu bewerkstelligen. Für übernatürliche Leistungen vergrössert sich der Zwischenwinkel zwischen Anfangs- und Endspannung der Leitung derart, dass die stabile Leistungsübertragung in Frage gestellt wird.

Bei einer längskompensierten Leitung ist der Leistungsbereich wesentlich kleiner. Dafür bleibt der Zwischenwinkel in sehr günstigen Grenzen, wird zum Teil sogar kleiner als bei der entsprechenden unkompensierten Leitung.

Beide Verfahren weisen also theoretisch Nachteile auf, es sei denn, man kombiniere die beiden Kompensationsarten, um die Vorteile zu vereinen und die Nachteile auszuschalten. Man könnte z. B.

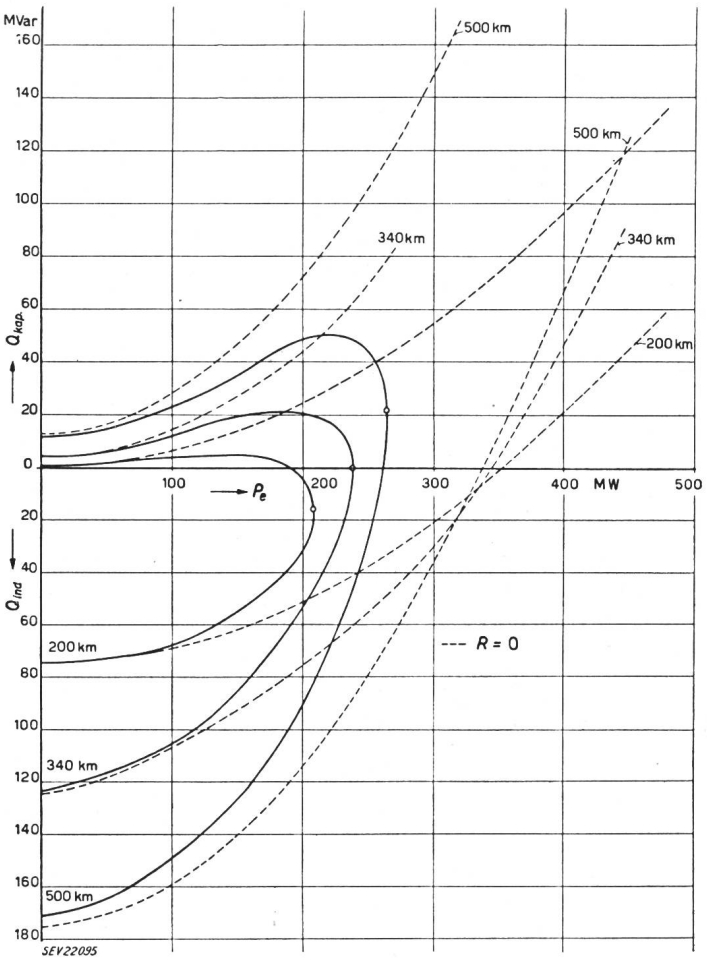

Fig. 9

Erforderliche Kompensationsblindleistung Q_l in Funktion der abgegebenen Wirkleistung P_e bei $\cos\varphi_e = 1$ für Leitungen mit Längskompensation

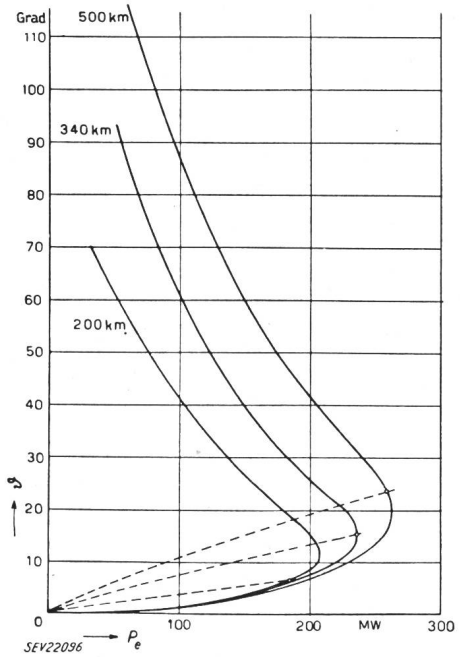

Fig. 10

Winkel ϑ zwischen Anfangs- und Endspannung in Funktion der abgegebenen Wirkleistung P_e bei $\cos\varphi_e = 1$ für Leitungen mit Längskompensation

- - - - - - - unkompensierte Leitung
——— kompensierte Leitung

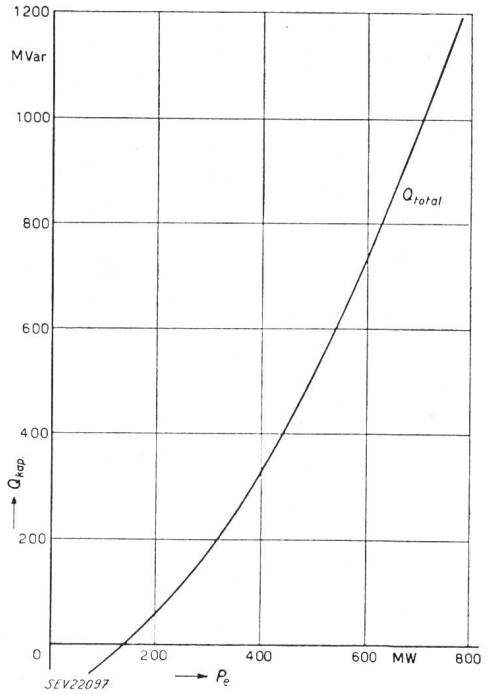

Fig. 11

Erforderliche Kompensationsblindleistung Q in Funktion der abgegebenen Wirkleistung P_e bei $\cos\varphi_e = 1$ für eine Fernleitung mit Quer- und Längskompensation

eine bestimmte Leitung mit einer konstanten Längskapazität versehen und mittels Querkompensation die Spannung halten. Für das Modell der 500 km langen Lukmanierleitung wurde dieses Verfahren angewendet und die in Fig. 11 wiedergegebenen Werte gemessen. Ohne dass auf die wirtschaftlichen Aspekte der dabei verwendeten Kompensationsmittel näher eingetreten sei, ist mit den zuletzt gezeigten Massnahmen eine mögliche Lösung zur stabilen Übertragung grosser Leistungen unter der Bedingung der Spannungshaltung gezeigt.

Adresse des Autors:
D. Oehler, dipl. El.-Ing. ETH, Assistent an der Professur für angewandte Elektrotechnik und Energiewirtschaft der ETH, Zürich 1.

Automatische Telephonzentralen «Hasler System 52»

Von *W. Keller*, Bern

621.395.34

Die neu entwickelten Bauelemente, die nach neuen Gesichtspunkten erfolgte konstruktive Durchbildung der Stromkreise sowie der wesentlich vereinfachte Vorgang für den Bau der Telephonzentralen werden dargestellt.

Le présent exposé décrit les nouveaux organes mis au point et les circuits de nouvelle conception qui caractérisent ce système de central téléphonique ainsi que le montage simple de celui-ci.

I. Einleitung

In einer früher im Bulletin SEV erschienenen Arbeit [1]) sind die nach neuen Überlegungen und Prinzipien entwickelten Stromkreise für die als «Hasler-System 52» bezeichnete Ausführung von automatischen Telephonzentralen behandelt worden. Die ersten dieser neuen Anlagen stehen nun schon seit mehreren Monaten bei der PTT in Betrieb und die bisher gemachten Betriebserfahrungen zeigen, dass die in das neue System gesetzten Erwartungen erfüllt werden.

In den nachfolgenden Kapiteln sollen, gewissermassen als Fortsetzung der ersten Arbeit, die Bauelemente, die konstruktive Durchbildung der Stromkreise und die neuartige Montage dieser Anlagen behandelt werden.

II. Bauelemente

Der Aufwand für den Unterhalt der automatischen Telephonzentralen bildet einen der wichtigsten Faktoren des Telephonbetriebes. Es wurde deshalb darnach getrachtet, mit einer möglichst kleinen Zahl von Bauelementen auszukommen und diese ferner so zu gestalten, dass ein möglichst geringer Aufwand für den Unterhalt notwendig ist. Weiter wurden die Konstruktionen der Apparate derart vereinfacht, dass deren Revision und Unterhalt durch Fachleute ohne grosse Spezialkenntnisse möglich ist.

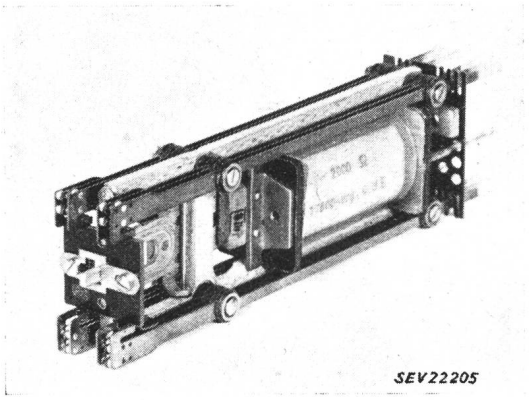

Fig. 1
Hasler Flachrelais

Als universell verwendbares *Relais* wird das schon vielfach bewährte Flachrelais (Fig. 1) verwendet. Mit Doppelkontakten aus Edelmetall ausgerüstet, kann es für alle notwendigen Aufgaben, als Zweischritt-Teilnehmerrelais, Prüfrelais, Speiserelais, Impulsrelais, Verzögerungsrelais, usw. verwendet werden, so dass irgendwelche Sonderkonstruktionen vermieden sind.

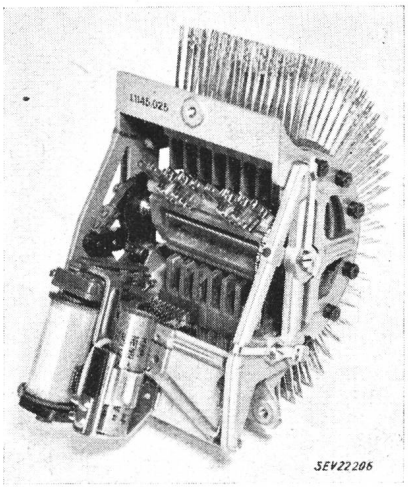

Fig. 2
Als 30-, 60- und 120teiliger Sucher verwendeter Drehschalter mit Schrittschaltantrieb

Neben dem Relais bilden die *Sucher* die wichtigsten Bestandteile der neuen Zentralen. Es wurden zwei neue Typen von Suchern (Wählern) entwickelt, die im grundsätzlichen Aufbau und in der Arbeitsweise gleich sind, dagegen aber verschieden grosse Anschlussmöglichkeiten in den Kontaktbänken aufweisen. Es sind beides durch Schrittschaltwerke direkt angetriebene Sucher, die eine Drehbewegung ausführen (Fig. 2 und 3). Dank einer sinnreichen Konstruktion lassen sich Antrieb und Bürstenwagen ohne jedes Werkzeug von der Kontaktbank wegnehmen und weiter zerlegen. Die Kontaktbänke sind doppelseitig ausgeführt, so dass durch das Aufeinanderschichten von 4 bis 8 dieser Bänke nach Belieben Kontaktbanksysteme mit 8×30 bis 16×30 Kontakten gebaut werden können.

[1]) *Berner H.:* Un nouveau chercheur et une nouvelle méthode de marquage dans un système de téléphonie automatique. Bull. SEV Bd. 44(1953), Nr. 11, S. 481...484.