

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. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. [Voir Informations légales.](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. [See Legal notice.](#)

Download PDF: 15.05.2025

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

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 gouttelette 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 er-

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.

Im Prüffeld hat sich gezeigt, dass der Strahl-

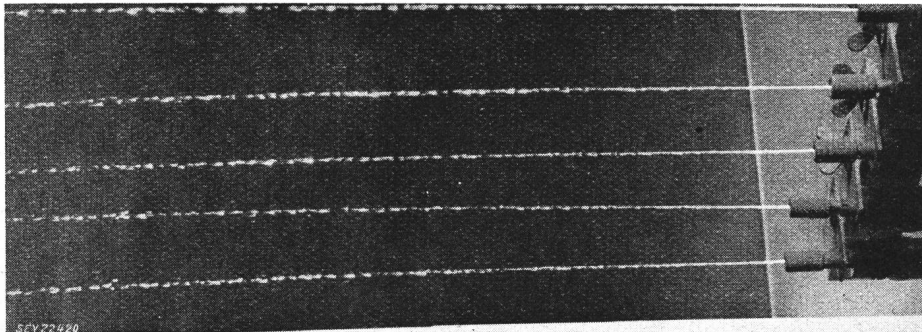


Fig. 1

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. $\frac{1}{10\,000}$ S

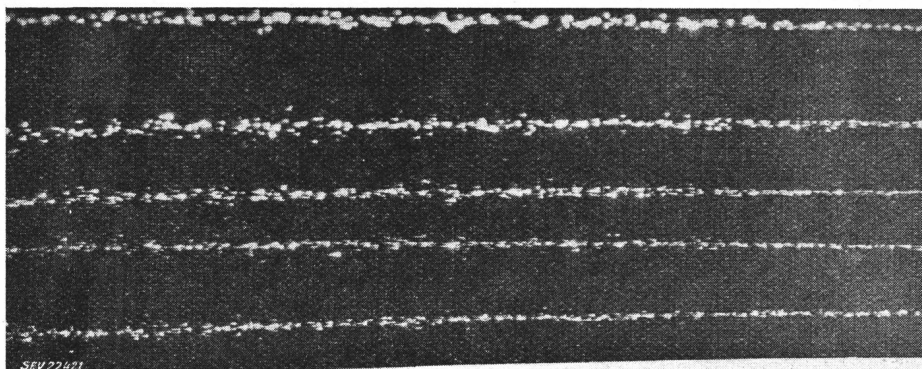


Fig. 2

Bild des Wasserstrahles
ca. 50 cm nach Verlassen der
Düsen

Wasserdruck $p = 1,5 \text{ kg/cm}^2$

verlauf 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 $mg =$ konstant und entgegengesetzt der Geschwindigkeit die Luftreibung $W = -a v^2$. v ist dabei die Relativgeschwindigkeit des Tropfens zu der umgebenden

halten, dass aus horizontal oder leicht schief gestellten Düsen Wasser unter $1,0 \dots 2,0 \text{ kg/cm}^2$ Druck ausgespritzt wird. Kurz nach Verlassen der Düse löst sich der zusammenhängende Wasserstrahl in einzelne Tropfen verschiedener Größe auf (Fig. 1 und

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 mg 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:

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

Die Fallzeit t für eine Fallhöhe h berechnet sich zu:

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

worin

$$K = \sqrt{\frac{2gG}{\Psi\gamma F}}$$

Für eine Wasserkugel vom Durchmesser d wird

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

d Durchmesser in m

$\gamma_2 = 1000 \text{ kg/m}^3$

$\Psi = 0,5$ (Kugel)

$\gamma = 1,3 \text{ kg/m}^3$, spezifisches Gewicht der Luft

$$F = d^2 \frac{\pi}{4}$$

$g = 9,81 \text{ m/s}^2$, Erdbeschleunigung

Damit ergibt sich:

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

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 $h = 1 \text{ m}$

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 verschiedenen 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 1 m 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:

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

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:

$$v_0 = \sqrt{2gH}$$

wobei $H = 10 \text{ m}$ 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:

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

wobei

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

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

Weg s , welchen Tropfen von verschiedenem Durchmesser d in der Zeit $t = 0,5 \text{ s}$ 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:

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

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

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

errechnet sich:

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

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		$72^\circ 30'$	64°	$44^\circ 30'$
v	m/s	3,12	3,98	5,9

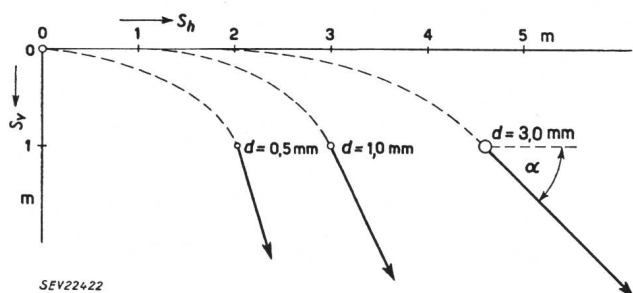


Fig. 3

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 Einfallswinkel

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

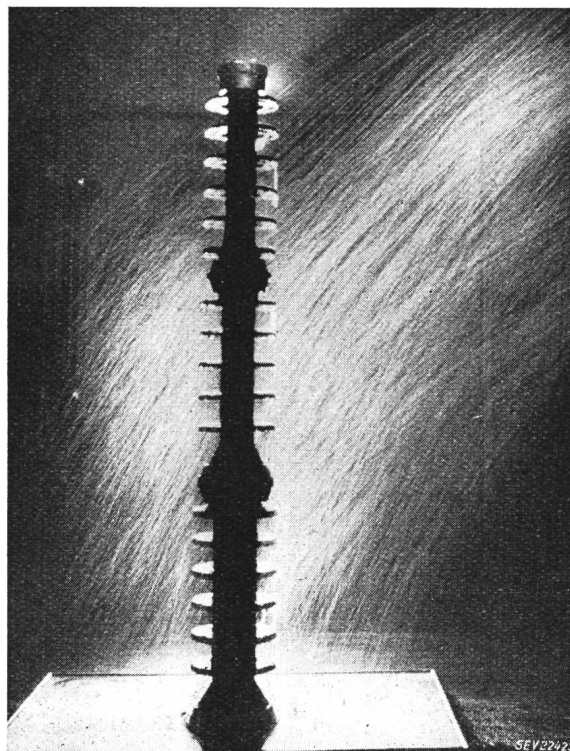


Fig. 4

Beregnung einer 2,2 m hohen Isolatorsäule bei Prüfspannung null
 Belichtung $\frac{1}{25}$ s

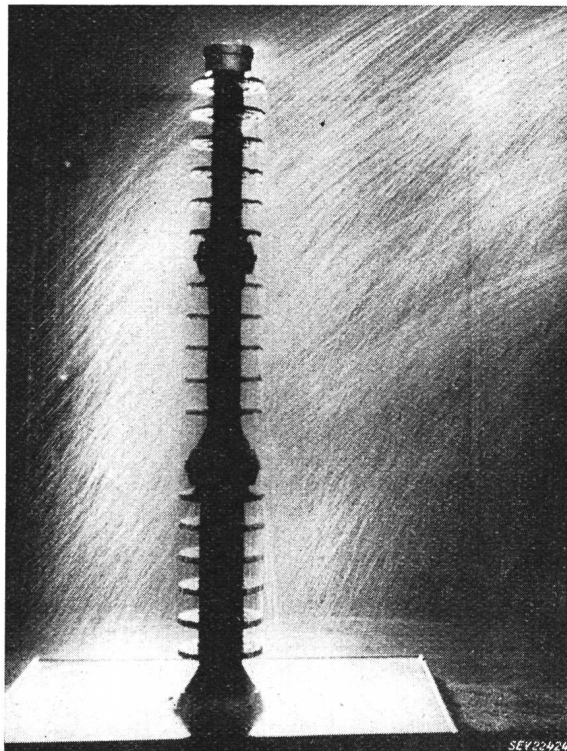


Fig. 5

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 berechneten 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 Beregnungseinrichtung¹⁾ wirklich reproduzierbare Messungen durchzuführen. 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.

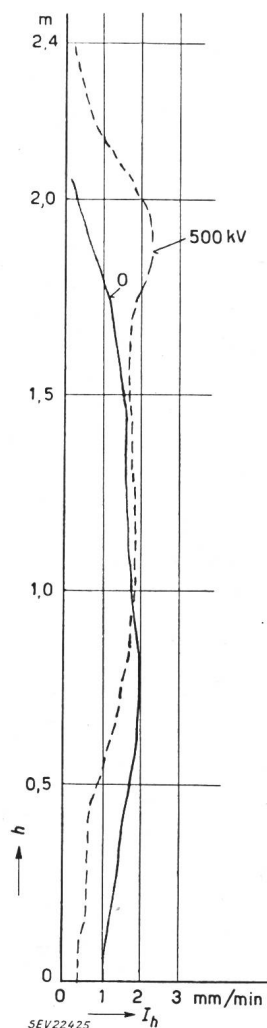


Fig. 6

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.

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

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

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 combinaison 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.

Betriebs mit über- bzw. unternatürlicher Leistung¹⁾. 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-

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

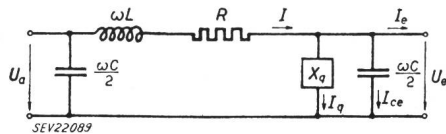


Fig. 3

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 $I_q \sqrt{R^2 + \omega^2 L^2}$ und $I_e \sqrt{R^2 + \omega^2 L^2}$ 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 $U_e / \sqrt{R^2 + \omega^2 L^2}$, dann werden die Spannungen zu Leistungen:

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

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

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 II-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 Hoch-

spannungsleitung eine maximal mögliche Übertragungsleistung, die nicht überschritten werden kann, wenn die Spannungshaltung noch gewährleistet wer-

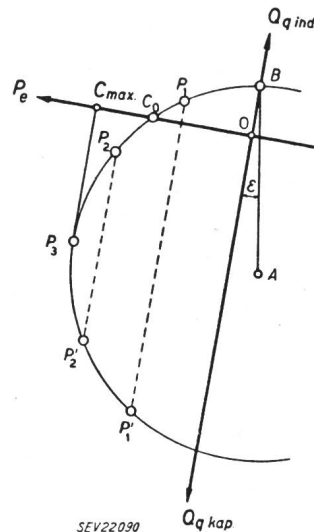


Fig. 4

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

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

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. 4¹⁾, 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;

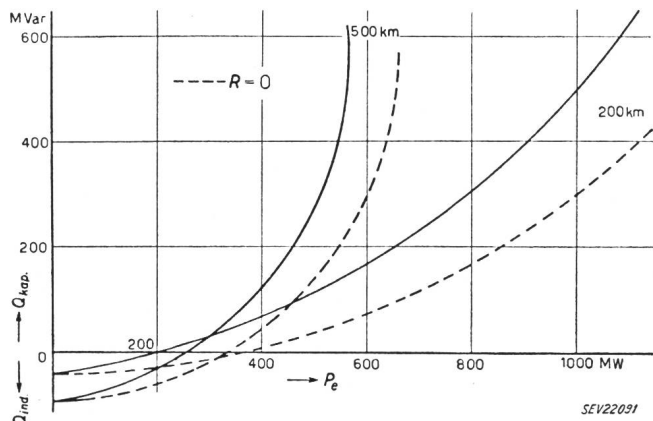


Fig. 5

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.

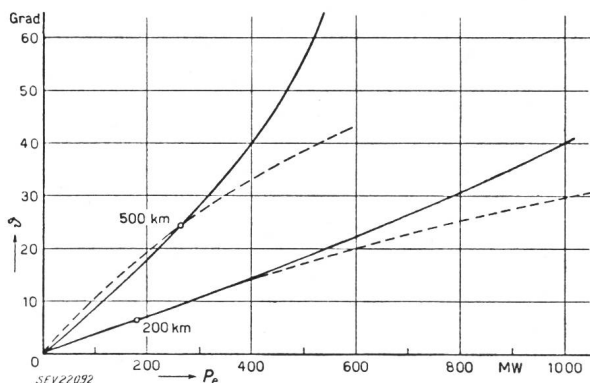


Fig. 6

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

---- unkompenzierte Leitung ————— kompenzierte Leitung

In Fig. 6 sind die Zwischenwinkel zwischen U_a und U_e in Funktion der Leistung P_e für unkompenzierte und kompenzierte 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 unkompenzierten 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

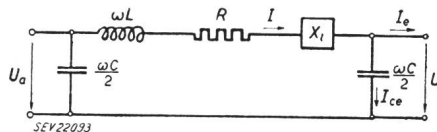


Fig. 7

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 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

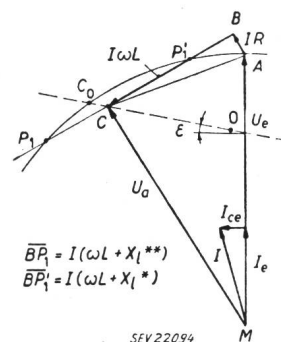


Fig. 8

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 OC der natürlichen Leistung der Leitung (als Π -Glieder 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 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. 4¹⁾, 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 unkomensierte und komensierte 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 unkomensierten Leitung.

Fig. 9

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

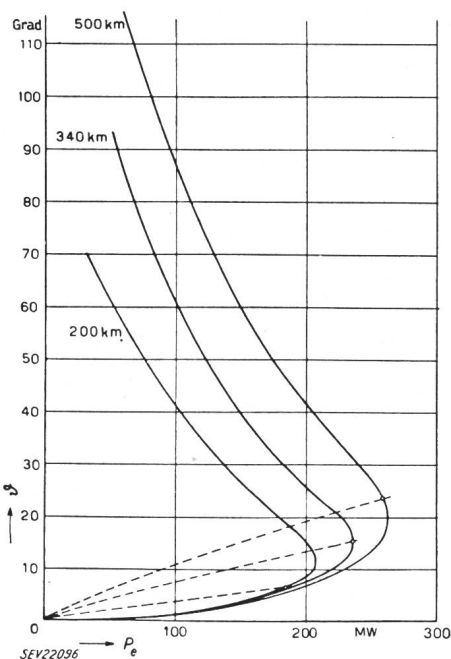


Fig. 10

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

----- unkomensierte Leitung
——— komensierte 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.

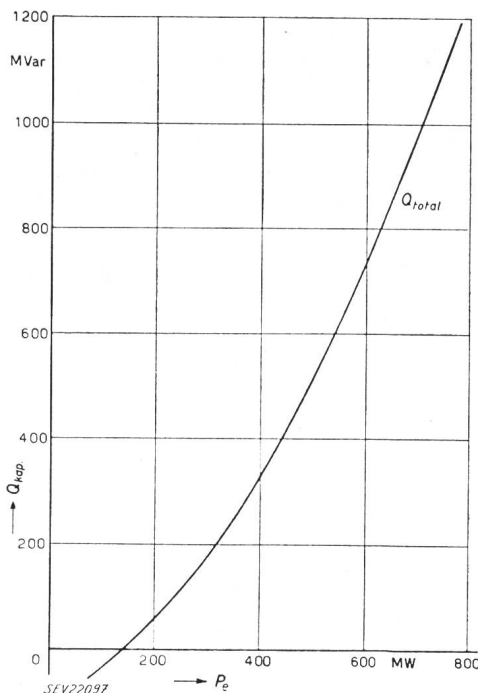
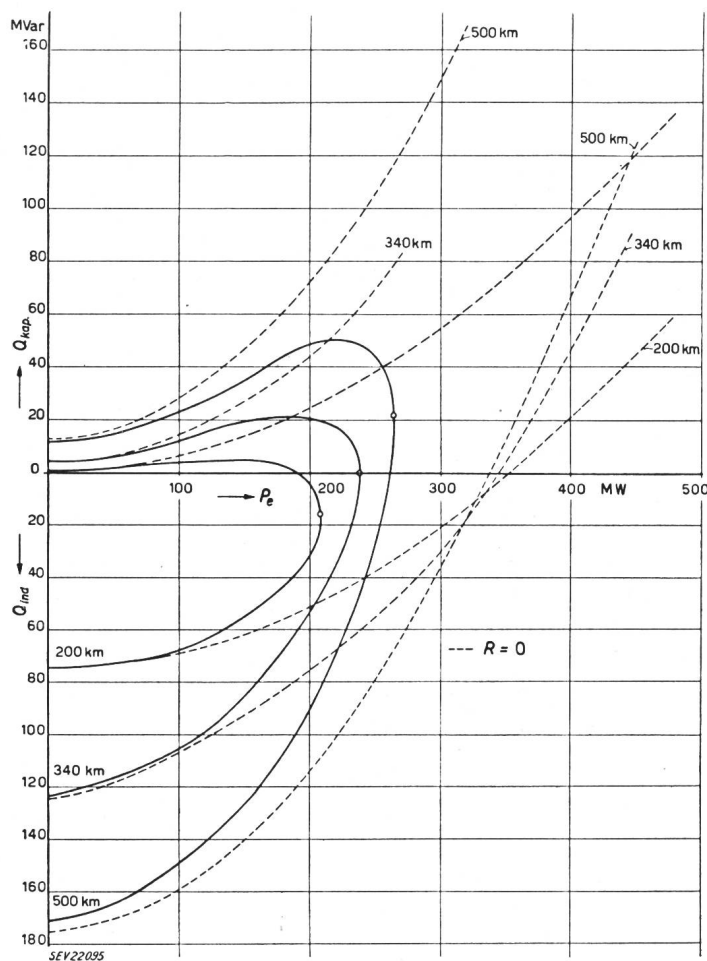


Fig. 11

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 Kompensationsmit-

tel 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 Arbeit¹⁾ 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 Unter-

halt durch Fachleute ohne grosse Spezialkenntnisse möglich ist.

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, Prüfreleais, Speisereleais, Impulsrelais, Verzögerungsrelais, usw. verwendet werden, so dass irgendwelche Sonderkonstruktionen vermieden sind.

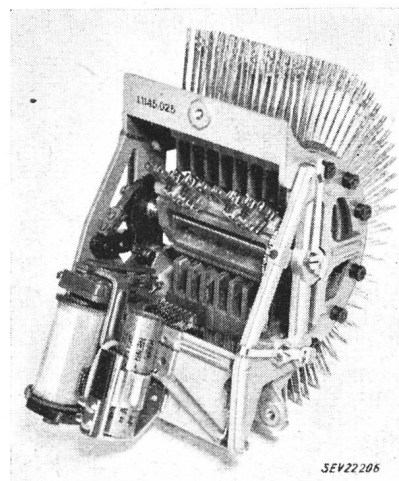


Fig. 2

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

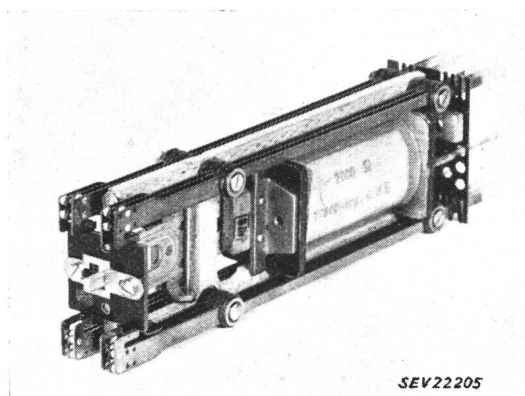


Fig. 1

Hasler Flachrelais

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.

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.