

**Zeitschrift:** Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins  
**Herausgeber:** Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke  
**Band:** 30 (1939)  
**Heft:** 3

**Artikel:** Leistungsabnahme aus Hochspannungsnetzen mittels kapazitiver Spannungsteiler  
**Autor:** Silbermann, S.  
**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-1060803>

### **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:** 03.04.2025

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

## Leistungsentnahme aus Hochspannungsnetzen mittels kapazitiver Spannungsteiler.

Von S. Silbermann, Berlin.

621.319.4 : 621.316.2

Oft besteht das Bedürfnis, einer nahen Hochspannungsleitung kleine Wirkleistungen zu entnehmen, um kleine Verbraucher mit Energie zu versorgen, z. B. Gehöfte, Fluglinienfeuer usw. Eine Transformatorstation kommt in solchen Fällen der hohen Kosten wegen nicht in Frage. Man kann jedoch mit Kondensatoren die Leistungskapazität anzapfen und dieser Energie entnehmen. Mit diesem Problem befasst sich die folgende Arbeit.

Die Theorie des kapazitiven Spannungsteilers zur Entnahme von Wirkleistungen aus einem Hochspannungsnetz wird entwickelt. Formeln zur Berechnung solcher Anlagen werden abgeleitet. Es werden ferner Diagramme zur graphischen Ermittlung der erforderlichen Kapazitäten der Kondensatoren sowie der Induktivität der Drosselspule entwickelt, die auch eine klare Uebersicht über die Betriebsgrößen des kapazitiven Spannungsteilers vermitteln. Zum Schluss werden die Ergebnisse der Berechnung und der graphischen Darstellung an Hand eines Beispiels erläutert.

Le cas se présente assez souvent, où l'on devrait prélever, d'une ligne à haute tension voisine, de faibles puissances actives pour alimenter de petits consommateurs tels que fermes isolées, balises, etc. Une station de transformation serait en l'occurrence beaucoup trop chère. On peut cependant se servir de condensateurs pour diviser la capacité de la ligne, et prélever l'énergie de ces condensateurs. L'auteur étudie ici ce problème. Il développe la théorie du diviseur de tension capacitif servant à prélever des puissances actives d'une ligne à haute tension, et en déduit des formules pour le calcul de ces installations. Il dresse des diagrammes pour la détermination graphique de la capacité des condensateurs et de l'inductivité des bobines nécessaires. Ces diagrammes donnent également un aperçu clair des grandeurs déterminantes pour le fonctionnement du diviseur de tension. Finalement, il cite à l'aide d'un exemple les résultats du calcul et du procédé graphique.

### A. Allgemeines.

Die Hochspannungsleitungen der Elektrizität durchziehen die Länder kreuz und quer und transportieren gewaltige Energiemengen zu den Zentren der Verbraucher. Es muss hierbei grotesk wirken, dass vielfach Kleinsiedlungen, Förstereien, Baustellen usw., die in der Nähe solcher Fernübertragungsleitungen liegen, nicht in der Lage sind, die nur wenigen Kilowatt, die sie gebrauchen könnten, zu entnehmen, während die vorbeiziehenden Leitungen Tausende, ja Hunderttausende von Kilowatt übertragen. Die am nächsten liegenden Ortschaften, wo niedergespannter Strom zu beziehen möglich wäre, liegen für diese kleinen Abnehmer in elektrischer Hinsicht zu weit, um die Energie wirtschaftlich herüberleiten zu können, während die Aufstellung von Transformatoren für die Entnahme solcher kleiner Leistungen bei der Höhe der Spannung viel zu kostspielig ist. Ebenso unangenehm ist es, um ein weiteres wichtiges Beispiel zu nennen, dass man nicht in der Lage ist, aus Mangel an passender Spannung, die Hochspannungsmasten zum Schutze der Verkehrsfliegerei in gewissen Abständen mit besonderen Leuchten zu versehen. Die Flugzeuge führen ihren Dienst bei Nacht und Nebel aus, und es liegt daher im Interesse der Flugsicherheit, die Hochspannungsleitung durch besondere kleine «Feuer» zu kennzeichnen. Auch dieses Problem könnte gelöst werden, wenn man eine Möglichkeit hätte, durch eine relativ billige Anlage Energie aus der Hochspannungsleitung zu entnehmen.

In der Messtechnik bedient man sich schon seit längerer Zeit des kapazitiven Spannungsteilers, um Spannungsmessungen usw. ausführen zu können. Man zapft beispielsweise die Kapazität von Hochspannungsdurchführungen an und erhält auf diese Weise die winzige Energie, die für das Anzeigen des Messinstrumentes erforderlich ist. Bei grösseren Leistungen von mehreren kW sind natürlich grössere Hochspannungskondensatoren als es Durchführungen sind, erforderlich. Durch die Entwicklung des Kondensatorenbaues im letzten Jahrzehnt ist es möglich geworden, Kondensatoren für sehr hohe

Spannungen und grössere Blindleistungen betriebsicher und preiswert herzustellen, und so ist der Weg freigemacht worden, den kapazitiven Spannungsteiler auch bei Leistungen von mehreren kW, die für die eingangs erwähnten Zwecke erforderlich sind, zu benutzen. So hat Brooks eine solche Anlage im Electr. J., Bd. 26, S. 477, beschrieben. Dort wird einem 110-kV-Netz eine Leistung von 2 kW entnommen. Für die Kapazitäten werden dort für die Ueberlagerung-Hochfrequenz-Telephonie die sog. Kopplungstypen verwendet, die man an den Hochspannungsmasten aufhängen kann. Eine grössere Anlage zur Entnahme von 15 kW aus einem 100-kV-Netz hat P. Hochhäusler im Archiv für Elektrotechnik 1934, Heft 5, beschrieben. Hier wird für die Kapazitäten ein Kabelkondensator benutzt. In der genannten Veröffentlichung wird auch eine Theorie des kapazitiven Spannungsteilers entwickelt.

Es unterliegt keinem Zweifel, dass bei den grossen Vorteilen, die derartige Spannungsteiler-Anlagen bieten, das Interesse für dieses Problem wachsen wird. Und somit scheint es mir angebracht zu sein, dieses Problem eingehend theoretisch zu behandeln und Unterlagen für die praktische Berechnung zu schaffen.

### B. Ableitung der wichtigsten mathematischen Beziehungen.

#### 1. Schaltung und Bezeichnungen.

Man gewinnt eine bessere Uebersicht über die Vorgänge im kapazitiven Spannungsteiler, wenn man mit Admittanzen statt Impedanzen rechnet.

Die Schaltung des kapazitiven Spannungsteilers ist aus Fig. 1 ersichtlich. An die Spannung  $U$  zwischen Hochspannungsleitung und Erde wird ein zweiteiliger Kondensator (oder 2 Kondensatoren), deren Kapazitäten  $C_1$  und  $C_2$  oder Admittanzen  $y_1$  und  $y_2$  in Serie geschaltet sind, angeschlossen. Parallel zur Admittanz  $y_2$  wird, nach Brooks, eine Drosselspule mit der Suszeptanz  $b$  in Serie mit der Nutzlast, der Leitwert  $g$ , geschaltet. Ohne Drosselspule würde die Gebrauchsspannung  $U_g$ , oder

die über einen besonderen Transformator herabgesetzte Gebrauchsspannung, zu stark mit der Belastung schwanken bzw. müssten die Kapazitäten verhältnismässig gross gewählt werden. In den folgenden Berechnungen wird mit der Spannung  $U_g$  gerechnet, ganz gleich, ob ein besonderer Transformator für den Anschluss des Verbrauchers vorgesehen wird oder nicht. Die Belastung  $g$  wird in dieser Abhandlung als rein ohmisch angenommen, wie dies praktisch überwiegend der Fall sein wird. In  $g$  sind auch die Verluste der Drosselspule, im Transformator und in den Zuleitungen mit enthalten.

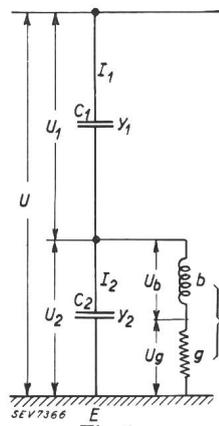


Fig. 1. Schaltschema des kapazitiven Spannungsteilers

Die gerichteten Grössen, wie Spannungen, Ströme, Admittanzen usw. sollen durch Buchstaben in Frakturschrift, während deren skalare Werte und sonstige Grössen mit lateinischen Buchstaben gekennzeichnet werden.

Es bedeuten im folgenden:

- $U$  und  $U$  die Spannungen,
- $\mathfrak{I}$  und  $I$  die Ströme,
- $\mathfrak{y}$  und  $y$  die Admittanzen,
- $\mathfrak{b}$  und  $b$  die Suszeptanz der Drosselspule,
- $g$  und  $g$  die Konduktanz der Nutzlast (einschliesslich Verluste),
- $P$  die Leistungen und Blindleistungen,
- $\cos \varphi$  den Leistungsfaktor der Anlage,
- $\eta$  den Ausnutzungsfaktor des kapazitiven Spannungsteilers.

Ferner bedeuten:

$$n = \frac{\mathfrak{y}_2}{\mathfrak{y}_1} = \frac{y_2}{y_1}; \quad m = \frac{U}{U_2} = \frac{U}{U_2}$$

$p$  den prozentualen Spannungsabfall von  $U_g$  bei Belastung gegenüber Leerlauf, und

$$\varepsilon = 1 - \frac{p}{100}; \quad q = y \cdot \frac{\varepsilon}{n+1}$$

$$\gamma = \sqrt{g^2 - y^2}; \quad \tau = \sqrt{y^2 + y_2^2 - 2 \cdot y \cdot y_2 \cdot \frac{\gamma}{g}}$$

$\psi$  Phasenwinkel.

### 2. Spannungen.

Da die Spannungen in den verschiedenen Zweigen einer Anlage sich umgekehrt proportional zu den betreffenden Admittanzen verhalten, gilt für die Schaltung nach Fig. 1:

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{\mathfrak{y}_2 + \mathfrak{y}}{\mathfrak{y}_1}$$

ferner ist

$$U = U_1 + U_2.$$

Hieraus ergibt sich:

$$U_2 = U \cdot \frac{\mathfrak{y}_1}{\mathfrak{y}_1 + \mathfrak{y}_2 + \mathfrak{y}} = U \cdot \frac{\mathfrak{y}_1}{\Sigma \mathfrak{y}} \quad (1)$$

und 
$$U_1 = U \cdot \frac{\mathfrak{y}_2 + \mathfrak{y}}{\Sigma \mathfrak{y}} \quad (2)$$

Aus den Beziehungen:

$$\frac{U_b}{U_g} = \frac{g}{b} \quad \text{und} \quad U_2 = U_g + U_b$$

ergibt sich (Fig. 2):

$$U_g = U_2 \cdot \frac{b}{g} \quad (3)$$

$$U_b = U_2 \cdot \frac{g}{b} \quad (4)$$

Die geometrische Summe von  $b$  und  $g$ , die in Serie geschaltet sind, ist  $\mathfrak{y}$ . Macht man also  $OO_3 = b$  und  $OA = g$ , so erhält man  $\mathfrak{y}$  bekanntlich in der Weise, dass man  $A$  und  $O_3$  verbindet und von  $O$  aus eine

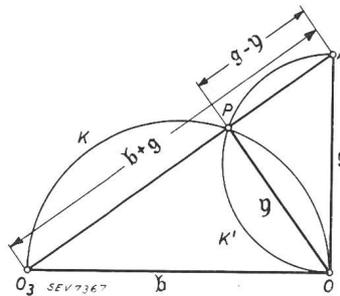


Fig. 2. Ermittlung der Admittanzen  $\mathfrak{y}$  aus der Serienschaltung von  $b$  und  $g$ .

Senkrechte zu dieser Verbindungslinie zieht.  $OP$  ist dann gleich  $\mathfrak{y}$ . Da der Winkel  $OPO_3$  demnach stets ein rechter ist, liegt bei konstantem  $b$  und veränderlichem  $g$  der geometrische Ort der Punkte  $P$  auf dem Halbkreise  $K$  oberhalb der Abszisse mit dem Durchmesser  $OO_3 = b$ . Andererseits liegt bei konstantem  $g$  und veränderlichem  $b$  der geometrische Ort der Punkte  $P$  auf dem Halbkreise  $K'$  links der Ordinate mit dem Durchmesser  $OA = g$ .

### 3. Ströme.

Es ergeben sich ohne weiteres:

$$\mathfrak{I}_1 = U_1 \cdot \mathfrak{y}_1 = U_2 \cdot (\mathfrak{y}_2 + \mathfrak{y}) = U \cdot \frac{\mathfrak{y}_2 + \mathfrak{y}}{\Sigma \mathfrak{y}} \cdot \mathfrak{y}_1 \quad (5)$$

$$\mathfrak{I}_2 = U_2 \cdot \mathfrak{y}_2 = U \cdot \frac{\mathfrak{y}_1 \cdot \mathfrak{y}_2}{\Sigma \mathfrak{y}} \quad (6)$$

$$\mathfrak{I} = U_2 \cdot \mathfrak{y} = U \cdot \frac{\mathfrak{y}_1 \cdot \mathfrak{y}}{\Sigma \mathfrak{y}} \quad (7)$$

### 4. Leistungen.

Die Wirkleistung beträgt:

$$P_g = U_g \cdot \mathfrak{I} = U_2 \cdot U_g \cdot \mathfrak{y} \quad (8)$$

und die Blindleistung der Drosselspule:

$$P_b = U_b \cdot \mathfrak{I} = U_2 \cdot U_b \cdot \mathfrak{y} \quad (9)$$

Die Blindleistung der Anlage, die überwiegend kapazitiv ist, setzt sich aus der Differenz der kapaziti-



Diese Spannungsdreiecke  $O_1P_1O$  sind offenbar viel übersichtlicher, denn der einmal für  $O_1O = 1$  festgelegte Maßstab gilt für alle Spannungsdreiecke.

Die *Ströme* können im Diagramm lediglich eingetragen werden. Wertmässig werden  $I_1$ ,  $I_2$  und  $I$  aus den Gl. (5), (6) und (7) berechnet. Der Richtung nach ist  $I_1$  senkrecht zu  $U_1$ ,  $I_2$  senkrecht zu  $U_2$  und  $I$  parallel zu  $U_g$  bzw. liegt um einen Winkel von  $(90 - \varphi)^\circ$  gegen  $U_2$ .

Die *Leistungen* bzw. *Blindleistungen* können aus dem Diagramm ermittelt werden, und zwar durch folgende Ueberlegung:  $K_1$  ist nicht nur der  $U_2$ -Kreis, sondern auch der  $U_1$ -Kreis, denn die Strecken  $P_1O$  geben jeweils  $U_1$  an. Nun ist aber  $U_1 \cdot \eta_1 = \mathfrak{S}_1$  und da  $\eta_1$  konstant, ist  $K_1$  also auch der  $I_1$ -Kreis, wobei allerdings zu beachten ist, dass der Richtung nach  $I_1$  jeweils senkrecht zu  $U_1$  steht. Wenn man aber die richtige Darstellung nach Grösse und Richtung erhalten will, so muss man folgende Feststellung treffen:

in Richtung der Abszissen-Achse liegen die Wirkspannungen und Blindströme, und  
in Richtung der Ordinaten-Achse liegen die Blindspannungen und die Wirkströme.

Demnach sind die Ordinaten der Punkte  $P_1$  proportional  $I_1 \cdot \sin(\varphi_2 - \varphi_1) = I_1 \cdot \cos \varphi =$  Wirkstrom. Da  $U$  konstant ist, ist  $P_1S$  auch proportional  $U \cdot I_1 \cdot \cos \varphi = P_g$ . Ebenso ist  $SO$  proportional  $U \cdot I_1 \cdot \sin \varphi = P_{bl}$ .

In den Punkten  $P_{10}$  (Leerlauf, d. h.  $g = 0$ ) und  $P_{1k}$  (Kurzschluss, d. h.  $g = \infty$ ) sind die Ordinatenlängen und somit auch die Wirkleistungen gleich Null, was auch selbstverständlich ist. Die grösste Ordinate hat der Punkt  $P_{1max}$ , also kann in diesem Betriebspunkte auch die grösste Leistung abgenommen werden. Ob aber auf diesem Punkte wirklich zweckmässig gearbeitet werden kann, wird im nächsten Abschnitt gezeigt, da noch verschiedene Umstände beachtet werden müssen.

#### D. Spannungsabfall und zulässige Höhe der Spannung $U_2$ .

Aus diesen Ausführungen sowie aus dem Diagramm Fig. 3 geht hervor, dass allein durch die Stellung der Aufgabe, wonach bei gegebener Oberspannung  $U$  eine gewisse Wirkleistung (bzw. Konduktanz  $g$ ) bei einer Gebrauchsspannung  $U_g$  (die zunächst nur beim Leerlaufzustande angegeben werden konnte —  $U_{g0}$ ) abgenommen werden sollte, die erforderlichen Kapazitäten und die Grösse der Drosselspule nicht eindeutig bestimmt werden können. Die Aufgabe kann bei verschiedenen Werten von  $b$  und  $y_1 + y_2$  gelöst werden. Eindeutige Lösungen sind nur zu erhalten, wenn man zusätzliche Bedingungen stellt, die aber, wie gleich gezeigt wird, für den Betrieb solcher Anlagen unerlässlich sind.

Zunächst muss man eine solche Bedingung stellen hinsichtlich des Spannungsabfalles. Es wäre ein unhaltbarer Zustand, wenn bei Aenderung der Belastung die Spannung  $U_g$  sich allzu stark ändern würde. Aus diesem Grunde wird man als *erste Bedingung* verlangen, dass die Differenz zwischen  $U_{g0}$

bei Leerlauf und  $U_g$  bei Vollast einen gewissen Prozentsatz der Leerlaufspannung nicht überschreitet.

Bei Leerlauf ist  $I=0$  und  $U_{g0}=U_{20}$ . Die Spannungen  $U_1$  und  $U_2$  verhalten sich dann umgekehrt proportional zu den Admittanzen  $y_1$  und  $y_2$ . Be-

zeichnet man  $\frac{y_2}{y_1} = n$ , dann ist

$$y_1 + y_2 = (n + 1) \cdot y_1 \quad (15)$$

und

$$U_{g0} = U_{20} = \frac{U}{n + 1} \quad (16)$$

Bezeichnet man ferner den zulässigen prozentualen Abfall der Spannung  $U_g$  gegenüber Leerlauf mit  $p$ , und

$$\varepsilon = 1 - \frac{p}{100} \quad (17)$$

so erhält man als erste Bedingung:

$$\frac{U}{n + 1} \geq U_g \geq \frac{U}{n + 1} \cdot \varepsilon \quad (18)$$

Die *zweite Bedingung*, die gestellt werden muss, ist, dass die Spannung  $U_2$ , und somit auch  $U_b$ , eine gewisse Grenze nicht überschreitet. Denn hohe  $U_2$  bedingen hohe Anschaffungskosten für die Kondensatoren  $C_2$  und ebenso hohe  $U_b$  für die Drosselspulen, wodurch die kapazitiven Spannungsteiler so kostspielig werden können, dass sie praktisch jede Bedeutung verlieren. Ein Blick auf das Diagramm Fig. 3 zeigt, dass  $U_2$ ,  $U_b$  und ebenso  $U_1$  immer grösser werden, je mehr man sich dem Kurzschlusspunkt  $P_{1k}$  nähert. Man muss daher als zweite Bedingung verlangen, dass  $U_2$  einen bestimmten Teil von  $U$  nicht überschreiten darf, d. h.

$$U_2 \leq \frac{U}{m} \quad (19)$$

Man kann, wie später gezeigt wird, auch eine dritte Bedingung stellen, etwa dass  $b$  in einem gewissen Verhältnis zu  $y_1 + y_2$  bemessen wird, oder dass  $b = \infty$ , d. h. die Drosselspule ganz wegfällt. In solchen Fällen muss eine der obengenannten beiden Bedingungen ausscheiden; sie wird aber durch die dritte sowieso erfüllt.

Zwischen den Grössen  $\varepsilon$ ,  $n$ ,  $m$ ,  $g$  und  $y$  bestehen gewisse Zusammenhänge. Es sei von folgenden Gleichungen ausgegangen:

$$U_g = \frac{U}{n + 1} \cdot \varepsilon \quad (18a) \quad \text{und} \quad U_2 = \frac{U}{m} \quad (19a)$$

Aus Gl. (3), (1) und (18a) folgt:

$$\frac{U}{n + 1} \cdot \varepsilon = U \cdot \frac{y_1}{\Sigma y} \cdot \frac{y}{g} \quad \text{bzw.} \quad \frac{y_1 \cdot y}{\Sigma y \cdot g} = \frac{\varepsilon}{n + 1}$$

da ferner, wie aus Fig. 3 hervorgeht,

$$\Sigma y \cdot \sin \psi_1 = y \cdot \cos \psi = \frac{y^2}{g}$$

ist, ergibt sich

$$\frac{y_1 \cdot \sin \psi_1}{y} = \frac{y_1 \cdot y}{\Sigma y \cdot g} = \frac{\varepsilon}{n+1} \quad (20)$$

Bezeichnet man:

$y_1 \cdot \sin \psi_1 = q$  (die Senkrechte zu  $\Sigma y$  von  $O_2$  aus), so ist

$$\frac{q}{y} = \frac{\varepsilon}{n+1} \text{ bzw. } \frac{q(n+1)}{y} = \varepsilon \quad (21)$$

Da  $O_1O = (n+1) \cdot O_1O_2$  ist, so ist  $OQ = q(n+1) = \varepsilon \cdot y$ . Zieht man von  $O$  aus eine Parallele zu  $q$ , so ist der Punkt  $Q$  der Schnittpunkt dieser Geraden mit der Geraden  $O_1P$ . Es folgt dann ohne weiteres, dass dann  $PQ = y \cdot \sqrt{1 - \varepsilon^2}$  ist. Macht man  $OP = 1$ , dann ist  $OQ = \varepsilon$  und  $PQ = \sqrt{1 - \varepsilon^2}$ . Macht man  $OP = U$ , dann ist

$$OQ = U \cdot \varepsilon = U_g \cdot (n+1) \quad (22)$$

d. h. die auf die Primärseite reduzierte Gebrauchsspannung.

Für das Dreieck  $O_1OP$  gilt, unter Berücksichtigung von Gl. (20):

$$\begin{aligned} \frac{y}{(n+1) \cdot y_1} &= \frac{\sin \psi_1}{\sin(90 + \psi - \psi_1)} = \frac{\sin \psi_1}{\cos(\psi_1 - \psi_2)} \\ &= \frac{y^2}{\Sigma y \cdot g \cdot \cos(\psi_1 - \psi)} \end{aligned}$$

also ist:

$$y \cdot (n+1) \cdot y_1 = \Sigma y \cdot g \cdot \cos(\psi_1 - \psi)$$

oder:

$$\begin{aligned} n+1 &= \frac{\Sigma y \cdot g}{y \cdot y_1} \cdot \cos(\psi_1 - \psi) = \\ &= \frac{n+1}{\varepsilon} \cdot \cos(\psi_1 - \psi) \end{aligned}$$

Somit wird:

$$\varepsilon = \cos(\psi_1 - \psi) \quad (23)$$

Hieraus ergibt sich die sehr wichtige Schlussfolgerung: Soll der Spannungsabfall für alle Belastungen ganz verschwinden, d. h.  $\varepsilon = 1$  bzw.  $p = 0$  werden, so muss  $\psi_1 - \psi = 0$  oder  $\psi_1 = \psi$  werden. Dies trifft nur dann zu, wenn  $O_1$  und  $O_3$  zusammenfallen bzw. wenn  $O_1O = OO_3$  ist, oder wenn

$$y_1 + y_2 = b \quad (24)$$

ist. D. h. macht man die Suszeptanz der Drosselspule so gross wie die Summe  $y_1 + y_2$  der Kondensatoren, so arbeitet der kapazitive Spannungsteiler

mit konstanter Spannung  $U_g = U_{g0} = \frac{U}{n+1}$  im ganzen Belastungsbereich.

Aus den Gl. (1) und (19a) folgt:

$$U_2 = \frac{U}{m} = U \cdot \frac{y_1}{\Sigma y},$$

also ist

$$m = \frac{\Sigma y}{y_1} \text{ und } \frac{\Sigma y}{y_1 + y_2} = \frac{m}{n+1} \quad (25)$$

ferner ist [s. Gl. (20)]:

$$\varepsilon = (n+1) \cdot \frac{y_1 \cdot y}{\Sigma y \cdot g} = \frac{n+1}{m} \cdot \frac{y}{g}$$

und somit:

$$y = \frac{\varepsilon \cdot m \cdot g}{n+1} \quad (26)$$

Nunmehr kann die eigentliche Aufgabe gelöst werden, d. h. die Bestimmung der Grössen der Kapazitäten und der Selbstinduktion.

### E. Bestimmung von $y_1$ , $y_2$ und $b$ .

#### 1. Graphische Methode.

Soll eine bestimmte Wirkleistung, Konduktanz  $g$ , einer Hochspannungsleitung, deren Spannung gegen Erde  $U$  beträgt, mit einer Gebrauchsspannung

$U_g = \frac{U}{n+1} \cdot \varepsilon$  entnommen werden und soll  $U_2 =$

$\frac{U}{m}$  sein, so kann man die Grössen der Kondensatoren und der Drosselspule wie folgt bestimmen.

Man zieht (s. Fig. 4) von einem Punkte  $O$  aus ein rechtwinkliges Koordinatensystem und trägt auf die Ordinate in irgendeinem Maßstabe  $g = OA$  auf. Mit  $OA$  als Durchmesser zeichnet man einen Halbkreis nach links, berechnet  $y$  aus Gl. (26) und

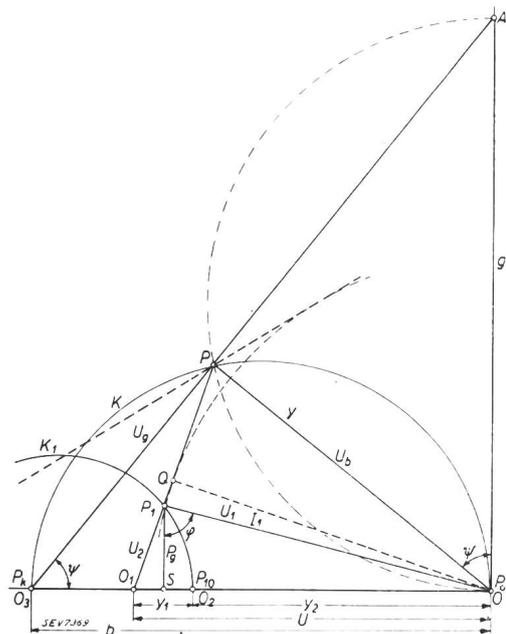


Fig. 4.

Diagramm des kapazitiven Spannungsteilers für  $U = 60 \text{ kV}$  (100-kV-Anlage),  $P_g = 10 \text{ kW}$ ,  $U_g = 9,4 \text{ kV}$ ,  $\varepsilon = 0,94$ ,  $n = 3$ ,  $m = 4$ .

zeichnet um  $O$  einen Bogen mit dem Halbmesser  $y$ . Der Schnittpunkt des erwähnten Halbkreises mit dem Bogen ergibt den Betriebspunkt  $P$ . Hierauf verbindet man  $A$  mit  $P$  und erhält auf der Abszisse den Punkt  $O_3$ . Es ist dann  $OO_3 = b$ , womit also die Suszeptanz der Drosselspule bestimmt ist. Man zieht dann um  $O$  einen weiteren Bogen mit dem Radius  $y \cdot \varepsilon$  und zeichnet von  $P$  aus eine Tangente an diesen Bogen. Da zwei Tangenten möglich sind,



Die Gl. (18) wird trotzdem erfüllt, denn  $\varepsilon$  ist hier gleich 1.

Für obigen Fall gilt aus Gl. (27) und (28):

$$\frac{y \cdot g}{\gamma} = \frac{\varepsilon \cdot g \cdot y}{\varepsilon \cdot \gamma + y \sqrt{1 - \varepsilon^2}} \quad (31)$$

Diese Gl. wird nur erfüllt, wenn  $\sqrt{1 - \varepsilon^2} = 0$  ist, d. h.  $\varepsilon = 1$  ist, wie nicht anders zu erwarten war. Die Grösse der Drosselspule und der Kapazitäten ergeben sich aus

$$b = y_1 + y_2 = \frac{y \cdot g}{\gamma} = \frac{U_g}{U_b} \cdot g \quad (32)$$

In diesem Falle ist das Diagramm (s. Fig. 6) ebenfalls einfach. Der Kreis  $K$  geht durch die Punkte

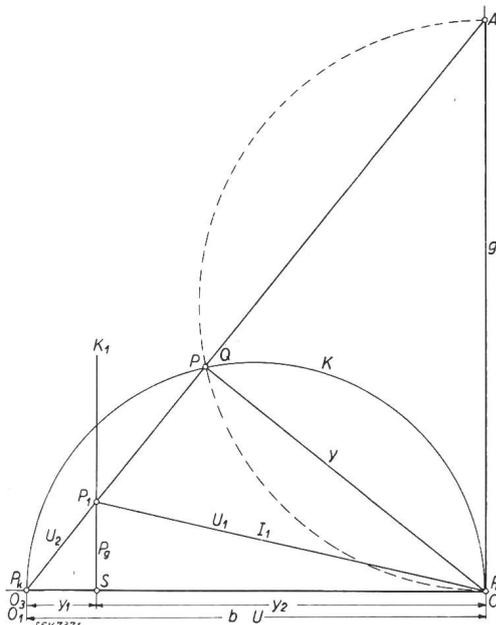


Fig. 6.

Diagramm des kapazitiven Spannungsteilers für  $U = 60$  kV (100-kV-Anlage),  $P_g = 10$  kW,  $U_g = 9,4$  kV,  $m = 4$ ,  $b = y_1 + y_2$ .

$O_1$  und  $O$ , und hat  $y_1 + y_2$  als Durchmesser. Der Kreis  $K_1$  geht in eine Gerade  $K_1$  über.  $Q$  fällt mit  $P$  zusammen, da der Spannungsabfall gleich Null ist.  $U_g = O_1P$  und  $U_b = PO$ , wenn man  $O_1O$  gleich  $U_2$  macht.

Aus Gl. (32) folgt auch, dass man den kapazitiven Spannungsteiler bei einmal gegebenen  $b$ ,  $y_1$  und  $y_2$  jede beliebige Leistung  $g$  entnommen werden kann. Da  $U_g$  konstant ist, wächst dann  $U_b$  in demselben Masse wie  $g$ , wodurch der Preis der Drosselspule ins Unermessliche steigen kann. Derselben steigt auch  $U_2$  und somit der Preis des Kondensators  $C_2$ . Das Anwachsen von  $U_2$  mit steigendem  $g$  kann aus Gl. (32) ermittelt werden. Es ergibt sich:

$$U_2 = \frac{U_g}{y_1 + y_2} \cdot \sqrt{g^2 + (y_1 + y_2)^2} \quad (33)$$

### H. Berechnung von $U_1, I_1, \cos \varphi$ und $\eta$ .

Zum Schluss sollen Berechnungsformeln auch für diese Grössen angegeben werden.

Aus dem Dreieck  $O_3PO$  folgt:

$$\eta_2 + \eta = \sqrt{y^2 + y_2^2 - 2 \cdot y \cdot y_2 \cdot \cos(90 - \varphi)} = \sqrt{y^2 + y_2^2 - 2 \cdot y \cdot y_2 \cdot \frac{\gamma}{g}} = \tau \quad (34)$$

Nach Gl. (2) ergibt sich dann:

$$U_1 = U \cdot \frac{\eta_2 + \eta}{\Sigma \eta} = \frac{U \cdot \tau}{m \cdot y_1} \quad (35)$$

ferner nach Gl. (5):

$$I_1 = U_1 \cdot y_1 = \frac{U}{m} \cdot \tau \quad (36)$$

Der Leistungsfaktor des kapazitiven Spannungsteilers ergibt sich nun unter Berücksichtigung der Gl. (8), (8a) und (18a) zu:

$$\cos \varphi = \frac{P_g}{U \cdot I_1} = \frac{U_g \cdot U_2 \cdot y}{U \cdot I_1} = \frac{U_g \cdot y}{m \cdot I_1} = \frac{U \cdot \varepsilon \cdot y}{(n + 1) \cdot m \cdot I_1} = \frac{y \cdot \varepsilon}{(n + 1) \cdot \tau} \quad (37)$$

Aus  $\cos \varphi$  kann man  $\text{tg } \varphi$  bestimmen und hat dann nach Gl. (12):

$$\eta = \frac{1}{\text{tg } \varphi + 2 \cdot \frac{g}{b}} = \frac{1}{\text{tg } \varphi + 2 \cdot \frac{\gamma}{y}} \quad (38)$$

### J. Beispiel.

Es soll nun an Hand eines praktischen Beispiels gezeigt werden, wie die Berechnung eines kapazitiven Spannungsteilers erfolgen kann.

Von einer 100-kV-Leitung, die also 60 kV gegen Erde hat, soll eine Wirkleistung von 10 kW abgenommen werden, bei einer Gebrauchsspannung von 10 kV, abzüglich 6% Spannungsabfall, also mit 9,4 kV. Die Spannung  $U_2$  soll 15 kV nicht überschreiten. Die 9,4 kV können über einen Transformator auf eine passende Niederspannung herabgesetzt werden, was aber hier nicht weiter interessiert. Die Betriebsfrequenz beträgt 50 Hertz.

Die gestellte Aufgabe muss, um die günstigste Lösung finden zu können, behandelt werden als

- allgemeiner Fall und unter den besonderen Voraussetzungen, dass
- $b = \infty$ , d. h. ohne Drosselspule, und
- $b = y_1 + y_2$ , d. h. dass der Spannungsabfall = 0 wird.

Durch Bestimmung von  $\eta$  für diese 3 Fälle findet man die günstigste Lösung mit annähernd geringstem Kostenaufwand.

Für die Werte  $\varepsilon$ ,  $n$  und  $m$  ergeben sich für die 3 Fälle folgende Zahlen:

- Im Falle a):  $\varepsilon = 0,94$ ,  $n = 5$  und  $m = 4$ .  
 » » b):  $\varepsilon = 0,94$ ,  $n = 5$  und  $m = 6,38$ ,  
 denn  $U_g = U_2$ , folglich  $m = \frac{U}{U_g}$   
 » » c):  $\varepsilon = 1,0$ ,  $n = 5,38$  und  $m = 4$ ,  
 denn  $U_g = U_{g0} = U_{20}$ , folglich ist  $n + 1 = \frac{U}{U_{g0}}$

Somit kann man jetzt folgende Tabelle aufstellen:

Tabelle I.

$U = 60 \text{ kV}, U_g = 9,4 \text{ kV}, P_g = 10 \text{ kW}, g = \frac{P_g}{U_g^2} = 1,13 \cdot 10^{-4}$				
	a) allgem. Fall	b) $b = \infty$	c) $b = y_1 + y_2$	
$\epsilon =$	0,94	0,94	1,0	
(Gl. 16) $n =$	5,0	5,0	5,38	
$m =$	4,0	6,38	4,0	
$\sqrt{1 - \epsilon^2} =$	0,34	0,34	0	
$y = \frac{\epsilon \cdot m \cdot g}{n + 1} =$	0,71	1,13	0,71	$10^{-4}$
$\gamma = \sqrt{g^2 - y^2} =$	0,88	0	0,88	$10^{-4}$
(Gl. 27) $b =$	0,91	$\infty$	0,91	$10^{-4}$
(Gl. 28) $y_1 + y_2 =$	0,708	3,12	0,91	$10^{-4}$
$y_1 =$	0,118	0,52	0,143	$10^{-4}$
$y_2 =$	0,59	2,6	0,767	$10^{-4}$
$L = \frac{1}{\omega \cdot b} =$	35	0	35	Henry
$C_1 = \frac{y_1}{\omega} =$	0,0376	0,165	0,0455	$\mu \text{ F}$
$C_2 = \frac{y_2}{\omega} =$	0,188	0,828	0,244	$\mu \text{ F}$
(Gl. 34) $\tau =$	0,447	2,835	0,492	$10^{-4}$
(Gl. 37) $\cos \varphi =$	0,249	0,0625	0,226	
$\text{tg } \varphi =$	3,89	16,0	4,315	
(Gl. 38) $\eta =$	0,157	0,0625	0,151	

Die günstigsten Werte von  $\eta$  liegen in den Fällen a) und c) vor. Praktisch wird man natürlich dem Fall c) den Vorrang geben, weil hier die Gebrauchsspannung bei allen Belastungen konstant bleibt. Lediglich des Interesses wegen seien die Betriebswerte für alle 3 Fälle angegeben (Tab. II).

Tabelle II.

$U_1 =$	57,2	51,2	51,6	kV
$U_2 =$	15	9,4	15	kV
$U_g =$	9,4	9,4	9,4	kV
$U_b =$	11,7	0	11,7	kV
$I_1 =$	0,675	2,66	0,74	A
$I_2 =$	0,885	2,44	1,15	A
$I =$	1,065	1,065	1,065	A

Der Vollständigkeit halber seien noch die einzelnen Blindleistungen berechnet, um hieraus zur Kontrolle die Werte  $\eta$  und  $\cos \varphi$  nochmals zu ermitteln.

Tabelle III.

$P_1 =$	38,6	136	38,2	kVA
$P_2 =$	13,3	23	17,25	kVA
$P_b =$	12,45	0	12,45	kVA
$P_{b1} =$	39,45	159	43,0	kVA
$P_t =$	64,35	159	67,9	kVA
$\eta = \frac{P_g}{P_t} =$	0,156	0,063	0,147	
$\text{ctg } \varphi = \frac{P_g}{P_{b1}} =$	0,254	0,063	0,232	
$\cos \varphi =$	0,246	0,0625	0,226	

Die geringfügigen Abweichungen der letzten beiden Werte von den vorher ermittelten Zahlen rühren vom Rechnen mit dem Rechenschieber her.

Die Diagramme für die 3 Fälle des gewählten Beispiels sind in den Fig. 4, 5 und 6 bereits enthalten. Erläuternd hierzu sei folgendes bemerkt:

Fig. 4 entspricht dem *allgemeinen Fall a)*. Wählen Admittanzen-Maßstab: 1 cm =  $0,15 \cdot 10^{-4}$ . Demnach  $OA = g = \frac{1,13}{0,15} = 7,53$  cm. Kreis um  $OA$ .  $y = 0,71 \cdot 10^{-4}$  entspricht 4,73 cm. Schlagen um  $O$  einen Bogen mit Radius 4,73 cm und finden Punkt  $P$ . Verbinden  $A$  mit  $P$  und verlängern bis Abszisse im Punkte  $O_3$ . Somit  $b = OO_3 = 6,07 \cdot 0,15 \cdot 10^{-4} =$

$0,91 \cdot 10^{-4}$ . Ziehen den Admittanzkreis  $K$  mit Durchmesser  $OO_3$ ;  $O$  ist der Leerlaufpunkt  $P_0$ , und  $O_3$  der Kurzschlusspunkt  $P_k$ . Ziehen Bogen um  $O$  mit Radius  $\epsilon \cdot y = 0,94 \cdot 0,71 \cdot 10^{-4} = 0,668 \cdot 10^{-4}$  entsprechend 4,45 cm und zu diesem Bogen Tangenten von  $P$  aus. Eine Tangente schneidet die Abszisse in  $O_1$ . Es ist  $O_1O = 4,72$  cm, und somit  $y_1 + y_2 = 0,708 \cdot 10^{-4}$ .  $y_1$  und  $y_2$  ergeben sich aus  $O_1O_2$  und  $O_2O$  zu  $0,118 \cdot 10^{-4}$  und  $0,59 \cdot 10^{-4}$ . Die andere Tangente schneidet die Abszisse ausserhalb der Zeichnung und ergibt grössere Werte für  $y_1$  und  $y_2$ , die weiter nicht interessieren.

Wir zeichnen jetzt den Kreis  $K_1$ , der zu  $K$  mit der Inversionspotenz  $P = OO_1 \cdot O_1O_2 = 4,72 \cdot 0,79 = 3,73$  invers ist. Der Leerlaufpunkt  $P_{10}$  fällt mit  $O_2$  zusammen und der Kurzschlusspunkt  $P_{1k}$  liegt  $\frac{P}{O_1P_k} = \frac{3,73^2}{1,35} = 2,76$  cm von  $O_1$  entfernt. Der Kreis  $K_1$  geht durch  $P_{10}$  und  $P_{1k}$  und hat  $P_{10}P_{1k}$  als Durchmesser. Der Schnitt der Linie  $O_1P$  mit dem Kreis  $K_1$  ergibt den Punkt  $P_1$ . Macht man  $O_1O = U = 60$  kV, also 1 cm = 12,7 kV, dann ist  $U_2 = O_1P_1 = 1,18 \cdot 12,7 = 15$  kV und  $U_1 = P_1O = 4,5 \cdot 12,7 = 57,2$  kV. Macht man ferner im Dreieck  $O_3PO$  die Seite  $O_3O = U_2$ , d. h. 1 cm = 2,47 kV, so ist  $U_g = O_3P = 3,8 \cdot 2,47 = 9,4$  kV und  $U_b = PO = 4,75 \cdot 2,47 = 11,7$  kV.

$P_1O$  stellt auch  $I_1$ , und  $P_1S$  stellt  $I_1 \cdot \cos \varphi$  dar. Der Strom-Maßstab lässt sich bestimmen aus

$I_{10} = U_{10} \cdot y_1 = 50 \cdot 10^3 \cdot 0,118 \cdot 10^{-4} = 0,59$  A =  $P_{10}O = 3,93$  cm zu 1 cm = 0,15 A. Daraus folgt  $I_1 = P_1O = 4,5 \cdot 0,15 = 0,675$  A und  $I_1 \cdot \cos \varphi = P_1S = 1,11 \cdot 0,15 = 0,167$  A. Der Leistungsmaßstab ist 1 cm =  $0,15 \cdot U = 0,15 \cdot 60 = 9$  kW und somit:  $P_g = P_1S = 1,11 \cdot 9 = 10$  kW und

$$P_{b1} = SO = 4,35 \cdot 9 = 39,15 \text{ kVA (in der Tabelle 39,45)}.$$

Fig. 5 entspricht dem *Fall b)*, also dem Falle *ohne Drosselspule*. Hier vereinfacht sich das Diagramm, wie gezeigt wurde, ganz wesentlich. Es seien hier nur die Maßstäbe und die Daten kurz angegeben.  $K$  ist hier eine Gerade, die mit der Ordinate zusammenfällt. Die Admittanzen trägt man im Maßstabe: 1 cm =  $0,3 \cdot 10^{-4}$  ein.  $OA = OP = 3,77$  cm, entsprechend dem Werte  $g \cdot \epsilon \cdot y = 1,062 \cdot 10^{-4}$ , demnach  $OQ = 3,54$  cm. Kreis  $K_1$  geht durch  $O_1$  und  $O_2$  mit  $y_1$  als Durchmesser.

Im Spannungsdreieck  $O_1P_1O$  entspricht  $O_1O = 10,4$  cm der Spannung  $U = 60$  kV, demnach 1 cm = 5,76 kV.

$$U_2 = U_g = O_1P_1 = 1,63 \cdot 5,76 = 9,4 \text{ kV.}$$

$$U_1 = P_1O = 8,9 \cdot 5,76 = 51,2 \text{ kV.}$$

$$I_{10} = U_{10} \cdot y_1 = 50 \cdot 10^3 \cdot 0,52 \cdot 10^{-4} = 2,6 \text{ A} = O_2O = 8,67 \text{ cm, demnach: 1 cm} = 0,3 \text{ A.}$$

$$I_1 = 8,9 \cdot 0,3 = 2,67 \text{ A und}$$

$$I_1 \cdot \cos \varphi = P_1S = 0,56 \cdot 0,3 = 1,68 \text{ A.}$$

Für die Leistungen gilt: 1 cm =  $0,3 \cdot U = 0,3 \cdot 60 \cdot 10^3 = 18$  kW, daraus:

$$P_g = P_1S = 0,56 \cdot 18 = 10,1 \text{ kW und} \\ P_{b1} = SO = 8,85 \cdot 18 = 159 \text{ kVA.}$$

Fig. 6 stellt den Fall dar, bei welchem  $b = y_1 + y_2$  ist. Auch hier ist das Diagramm wesentlich einfacher als im Falle a). Der Admittanzen-Maßstab sei gewählt mit 1 cm =  $0,15 \cdot 10^{-4}$ .  $\epsilon \cdot y = y = 0,71 \cdot 10^{-4}$ , entsprechend 4,73 cm.  $K_1$  ist eine Gerade, die durch  $O_2$ , senkrecht zur Abszisse, geht. Im Spannungsdreieck  $O_1P_1O$  ist  $O_1O = 6,07$  cm = 60 kV, demnach 1 cm = 9,89 kV. Somit ist  $U_2 = O_1P_1 = 1,52 \cdot 9,89 = 15$  kV und  $U_1 = P_1O = 5,23 \cdot 9,89 = 51,6$  kV.

Im Dreieck  $O_3PO$  ist  $O_3O = 6,07$  cm = 15 kV, demnach 1 cm = 2,47 kV. Somit  $U_g = O_3P = 3,8 \cdot 2,47 = 9,4$  kV und  $U_b = PO = 4,7 \cdot 2,47 = 11,7$  kV.

Da  $U_{10} = 60 - 9,4 = 50,6$  kV ist, ist

$$I_{10} = 50,6 \cdot 0,143 \cdot 10^3 \cdot 10^{-4} = 0,724 \text{ A} = 5,1 \text{ cm,}$$

also 1 cm = 0,141 A. Daraus folgt:

$$I_1 = 5,23 \cdot 9,141 = 0,74 \text{ A.}$$

$$I_1 \cdot \cos \varphi = P_1S = 1,18 \cdot 0,141 = 0,166 \text{ A.}$$

Ferner: 1 cm =  $60 \cdot 10^3 \cdot 0,141 = 8,46$  kW, und somit:  $P_g = 1,18 \cdot 8,46 = 10$  kW und  $P_{b1} = 5,11 \cdot 8,46 = 43,2$  kVA (in der Tabelle 43,0 kVA).