

Zeitschrift: Bulletin de l'Association suisse des électriciens
Herausgeber: Association suisse des électriciens
Band: 30 (1939)
Heft: 3

Artikel: Leistungsabnahme aus Hochspannungsnetzen mittels kapazitiver Spannungsteiler
Autor: Silbermann, S.
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-1058334>

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: 25.12.2024

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 Konduktanz 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.

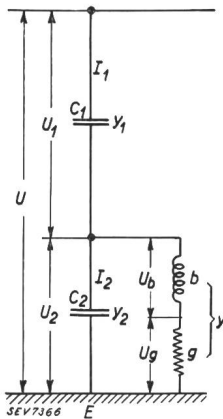


Fig. 1.
Schalt-schema des kapazitiven Spannungsteilers

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{S} und I die Ströme,
- \mathfrak{y} und y die Admittanzen,
- 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,
- η den Ausnutzungsfaktor des kapazitiven Spannungsteilers.

Ferner bedeuten:

$$n = \frac{y_2}{y_1} = \frac{y_2}{y_1}; \quad m = \frac{U}{U_2} = \frac{U}{U_2}$$

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

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

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

ψ 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:

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{y_2 + y}{y_1}$$

ferner ist

$$U = U_1 + U_2.$$

Hieraus ergibt sich:

$$U_2 = U \cdot \frac{y_1}{y_1 + y_2 + y} = U \cdot \frac{y_1}{\Sigma y} \quad (1)$$

$$\text{und} \quad U_1 = U \cdot \frac{y_2 + y}{\Sigma y} \quad (2)$$

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):

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

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

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

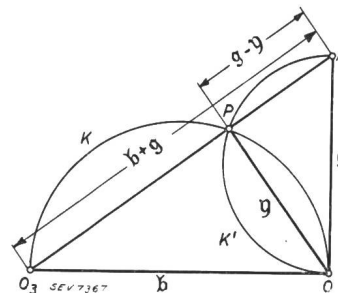


Fig. 2.
Ermittlung der Admittanzen y aus der Serienschaltung von b und g .

Senkrechte zu dieser Verbindungslinie zieht. OP ist dann gleich 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:

$$\mathfrak{S}_1 = U_1 \cdot \mathfrak{y}_1 = U_2 \cdot (y_2 + y) = U \cdot \frac{y_2 + y}{\Sigma y} \cdot \mathfrak{y}_1 \quad (5)$$

$$\mathfrak{S}_2 = U_2 \cdot \mathfrak{y}_2 = U \cdot \frac{y_1 \cdot y_2}{\Sigma y} \quad (6)$$

$$\mathfrak{S} = U_2 \cdot \mathfrak{y} = U \cdot \frac{y_1 \cdot y}{\Sigma y} \quad (7)$$

4. Leistungen.

Die Wirkleistung beträgt:

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

und die Blindleistung der Drosselspule:

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

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

ven und induktiven Blindleistungen zusammen, d. h.

$$P_{bl} = P_1 + P_2 - P_b = U_1^2 \cdot y_1 + U_2^2 \cdot y_2 - U_b^2 \cdot b \quad (10)$$

Man kann auch schreiben:

$$P_g = U \cdot I_1 \cdot \cos \varphi \quad (8a)$$

$$P_{bl} = U \cdot I \cdot \sin \varphi \quad (10a)$$

Zur Abnahme der Wirkleistung P_g sind Blindleistungsapparate erforderlich mit einer totalen Blindleistung

$$P_t = P_1 + P_2 + P_b = P_{bl} + 2 \cdot P_b \quad (11)$$

Als Ausnutzungsfaktor der Anlage sei definiert:

$$\eta = \frac{P_g}{P_t} = \frac{P_g}{P_{bl} + 2 \cdot P_b} = \frac{P_g}{P_g \cdot \operatorname{tg} \varphi + 2 \cdot \frac{g}{b} \cdot P_g} = \frac{1}{\operatorname{tg} \varphi + 2 \cdot \frac{g}{b}} \quad (12)$$

da er einen Anhaltspunkt dafür gibt, welche Aufwendungen an Blindleistungsapparaten — und angenähert an Anlagekosten — gemacht werden müssen, um eine gewisse Wirkleistung aus dem Hochspannungsnetz entnehmen zu können. Genauere Werte können nur dann ermittelt werden, wenn man die tatsächlichen Kosten der Kondensatoren und der Drosselspule einsetzt. Die Kosten des Transformators spielen hierbei keine Rolle, denn der Transformator bleibt, unabhängig von der Wahl der Grösse der Kondensatoren und der Drosselspule, doch derselbe.

C. Darstellung der Betriebsvorgänge durch Diagramme.

Von einem Punkte O_1 aus (Fig. 3) wird auf der Abszisse die Strecke $O_1O_2 = y_1$ aufgetragen, daran anschliessend $O_2O = y_2$ und schliesslich in entgegengesetzter Richtung $OO_3 = b$ (weil b induktiv ist, während y_1 und y_2 kapazitiv sind). Im Punkte O

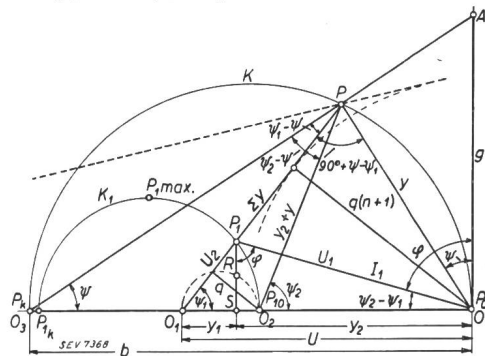


Fig. 3. Diagramm des kapazitiven Spannungsteilers.

errichtet man die Ordinatenachse, auf welche die Werte g eingetragen werden. Schlägt man den Kreis K mit dem Durchmesser $OO_3 = b$, so erhält man, wie aus Fig. 2 hervorgeht, den y -Kreis (Admittanzkreis) für die Betriebspunkte P . Die resultierende Admittanz aus der Serienschaltung von b und g ist jeweils $= \eta = OP$, wobei man den jeweiligen Punkt

P findet, indem man den beweglichen Punkt A mit O_3 verbindet und den Schnittpunkt dieser Linie mit dem Kreis K sucht. Es ist ohne weiteres ersichtlich, dass für jeden Punkt P die Strecken

$$O_1P = \eta_1 + \eta_2 + \eta = \Sigma \eta \text{ und}$$

$$O_2P = \eta_2 + \eta$$

sind. Die Winkel zwischen den Admittanzen seien bezeichnet mit:

$$\sphericalangle AOP = \sphericalangle OO_3P = \Psi; \quad \sphericalangle OO_1P = \Psi_1;$$

$$\sphericalangle OO_2P = \Psi_2.$$

Aus den Gl. (1) und (2) folgt:

$$\eta : \eta_1 : \eta_2 = 1 : \frac{\eta_2 + \eta}{\Sigma \eta} : \frac{\eta_1}{\Sigma \eta} = \Sigma \eta : (\eta_2 + \eta) : \eta_1 \quad (13)$$

d. h., macht man $O_1P = \eta$, dann ist $O_2P = \eta_1$ und $O_1O_2 = \eta_2$. Das Dreieck O_1PO_2 ist also das Spannungsdreieck für U, U_1 und U_2 .

Schlägt man einen Kreis O_1O_2 als Durchmesser und zieht O_1R parallel zu O_3P , so ist $O_1R = U_g$ und $RO_2 = U_b$, wie aus den Gl. (3) und (4) hervorgeht; denn $\frac{y}{g} = \cos \psi$ und $\frac{y}{b} = \sin \psi$. Da das Dreieck O_3PO dem Dreieck O_1RO_2 ähnlich ist, ist auch $U_g = O_3P$ und $U_b = PO$, wenn man O_3O gleich macht U_2 .

Das Dreieck O_1PO_2 ist aber wenig geeignet zur Darstellung der Spannungsverhältnisse, denn U ist konstant, während $\Sigma \eta = O_1P$ für jeden Punkt eine andere Länge hat. Man müsste also für jeden Belastungspunkt P den Maßstab neu bestimmen. Es soll daher hierfür gleich eine andere Lösung angegeben werden.

Aus Gl. (1) folgt

$$\eta_2 \cdot \Sigma \eta = \eta \cdot \eta_1 = \text{konst.} = P$$

Bei Leerlauf fällt der Punkt P in P_0 . Also ist

$$P = \eta \cdot \eta_1 = O_1O \cdot O_1O_2 = \text{konst.}$$

Hieraus folgt, dass man die Vektoren $O_1P_1 = \eta_2$ darstellen kann durch eine Kurve, die zur Kurve K , die die Endpunkte von $\Sigma \eta$ angibt, in bezug auf das Inversionszentrum O_1 invers ist, und zwar mit der Inversionspotenz $P = O_1O \cdot O_1O_2$. Da der Kreis K nicht durch das Inversionszentrum O_1 geht, ist auch die Kurve K_1 ein Kreis. Dem Punkte P_0 auf K entspricht der Punkt P_{10} auf K_1 , der mit O_2 zusammenfällt. Dem Kurzschlusspunkte P_k auf K entspricht der Punkt P_{1k} auf K_1 , der in der Entfernung

$$\frac{P}{O_1O_3} = \frac{O_1O \cdot O_1O_2}{O_1O_3}$$

von O_1 aus liegt. Damit hat man den Durchmesser von K_1 gefunden; dieser ist $P_{10}P_{1k}$. Jedem Punkte P auf dem Kreise K entspricht nun ein Punkt P_1 auf dem Kreise K_1 , der auf der Verbindungslinie O_1P liegt. Macht man nun

$$O_1O = \eta, \text{ so sind } O_1P_1 = \eta_2 \text{ und } P_1O = \eta_1.$$

Diese Spannungsdreiecke O_1P_1O sind offenbar viel übersichtlicher, denn der einmal für $O_1O = U$ 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 $(90 - \psi)^\circ$ 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 $U_1 \cdot \eta_1 = S_1$ und da η_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 $I_1 \cdot \sin(\psi_2 - \psi_1) = I_1 \cdot \cos \varphi =$ 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 Ober-
spannung 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 ε, 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 $\Sigma \eta$ 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

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

$\frac{U}{m}$ 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

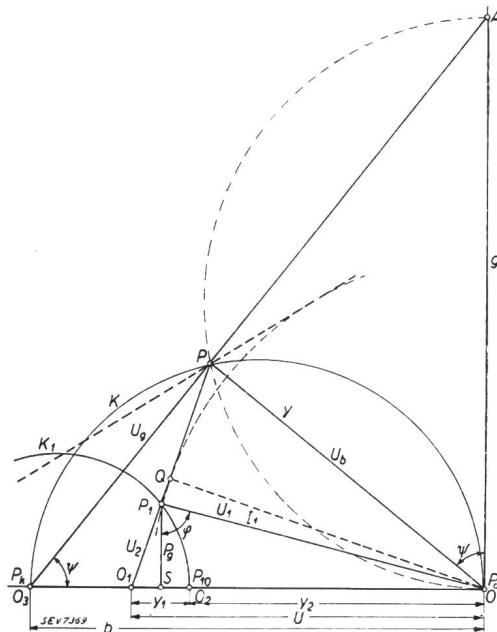


Fig. 4.

Diagramm des kapazitiven Spannungsteilers für $U = 60$ kV (100-kV-Anlage), $P_0 = 10$ kW, $U_0 = 9,4$ kV, $\varepsilon = 0,94$, $n = 5$, $m = 4$.

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,

ergeben sich 2 Lösungen, von denen allerdings nur eine praktisch in Frage kommt, und zwar diejenige, die die kleineren Werte für die Kapazitäten ergibt. Die eine Tangente schneidet die Abszisse im Punkte O_1 , was somit $y_1 + y_2 = O_1O$ ergibt. Die zweite Tangente schneidet die Abszisse ausserhalb der Zeichnung und gibt die zweite Lösung, mit viel grösseren Werten für die Admittanzen, die also weiter nicht interessiert. Diese zweite Lösung ist auch aus dem Grunde praktisch wertlos, weil bei Erhöhung des zulässigen Spannungsabfalls die Grösse der Kapazitäten nicht abnimmt, wie dies bei der ersten Lösung der Fall ist, sondern zunimmt.

y_1 und y_2 können dann bestimmt werden aus

$$y_1 = \frac{y_1 + y_2}{n + 1} \quad \text{und} \quad y_2 = (y_1 + y_2) \cdot \frac{n}{n + 1}$$

wodurch der Punkt O_2 festgelegt wird.

2. Rechnerische Bestimmung.

Aus der Beziehung (s. Fig. 2)

$$\frac{b}{\sqrt{b^2 + g^2}} = \frac{y}{g} = \frac{\epsilon \cdot m}{n + 1}$$

folgt:

$$b = \frac{\epsilon \cdot m \cdot g}{\sqrt{(n+1)^2 - \epsilon^2 \cdot m^2}} = \frac{y}{\sqrt{1 - \frac{\epsilon^2 \cdot m^2}{(n+1)^2}}}$$

$$= \frac{y}{\sqrt{1 - \left(\frac{y}{g}\right)^2}} = \frac{y \cdot g}{\gamma} \quad (27)$$

Da für b nur positive Werte zu gebrauchen sind, wurde für die Wurzelwerte das $+$ -Zeichen genommen.

Nach Gl. (20) ist

$$\sin \psi_1 = \frac{y \cdot \epsilon}{y_1 \cdot (n + 1)}$$

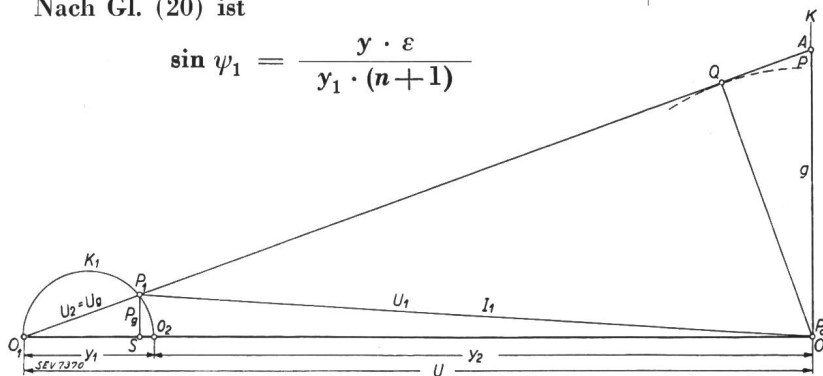


Fig. 5.

Diagramm des kapazitiven Spannungsteilers für $U = 60$ kV (100-kV-Anlage), $P_g = 10$ kW, $U_g = 9,4$ kV, $n = 5$, $b = \infty$, also ohne Drosselspule.

andererseits ist unter Beachtung der Gl. (23):

$$\sin \psi_1 = \sin [\psi - (\psi - \psi_1)] = \sin \psi \cdot \cos(\psi - \psi_1)$$

$$- \cos \psi \cdot \sin(\psi - \psi_1) = \frac{y}{b} \cdot \epsilon \mp \frac{y}{g} \cdot \sqrt{1 - \epsilon^2}$$

$$= y \cdot \left(\frac{\epsilon}{b} \mp \frac{\sqrt{1 - \epsilon^2}}{g} \right)$$

also gilt:

$$\frac{\epsilon}{y_1 \cdot (n + 1)} = \frac{\epsilon}{b} \mp \frac{\sqrt{1 - \epsilon^2}}{g} = \frac{\epsilon \cdot \gamma}{y \cdot g} \mp \frac{\sqrt{1 - \epsilon^2}}{g}$$

woraus folgt:

$$y_1 + y_2 = y_1 \cdot (n + 1) = \frac{\epsilon \cdot g \cdot y}{\epsilon \cdot \gamma \mp y \cdot \sqrt{1 - \epsilon^2}} \quad (28)$$

Es ergeben sich also auch hier, genau wie bei der graphischen Lösung, zwei Lösungen, je nachdem man das negative oder das positive Vorzeichen nimmt. Das positive Vorzeichen ergibt kleinere Kapazitäten, infolgedessen kommt nur das positive Vorzeichen in Frage.

Neben dem allgemeinen Fall, für welchen die Gl. (27) und (28) gelten, sollen hier noch 2 Sonderfälle betrachtet werden, für welche die von uns bereits erwähnte dritte Bedingung gilt, und für welche eine der beiden Gleichungen (18a) und (19a) nicht gelten.

F. Kapazitiver Spannungsteiler ohne Drosselspule.

In diesem Falle ist $b = \infty$ und es wird

$$b = \frac{y \cdot g}{\gamma} = \infty, \quad \text{d.h.} \quad \gamma = \sqrt{g^2 - y^2} = 0$$

$$\text{oder} \quad g = y \quad (29),$$

was auch selbstverständlich ist, denn g fällt mit y zusammen. Ferner wird dann

$$y_1 + y_2 = \frac{\epsilon \cdot g}{\sqrt{1 - \epsilon^2}} \quad (30)$$

Durch Einführung der Bedingung $b = \infty$ kann die Bedingung (19a) fortfallen, denn dadurch, dass $U_g = U_2$ ist, ist schon die erwünschte Begrenzung für U_2 dadurch gegeben, dass U_g durch ϵ begrenzt ist. Die Grösse m spielt hier also keine Rolle.

Zeichnet man für diesen Fall das Diagramm wie in Fig. 3, so erhält man Fig. 5. Hier fallen g und y zusammen, also auch die Punkte A und P . Statt des Kreises K ergibt sich jetzt eine Gerade K . Der Kreis K_1 geht jetzt durch die Punkte O_1 und O_2 , hat also y_1 als Durchmesser. Den Punkt Q findet man wie bereits angegeben. Macht man $U_{20} = O_1O$, so kann man U_2 und U_g , die unter sich gleich sind, dem grossen Dreieck O_1QO entnehmen, und zwar der Strecke O_1Q . $OP - OQ$ gibt den Spannungsabfall an. Man erkennt, dass man

eine um so grössere Leistung P_g abnehmen kann, je grösser die Kapazitäten sind.

G. Kapazitiver Spannungsteiler ohne Spannungsabfall.

In diesem Falle ist $b = y_1 + y_2$. Durch diese dritte Bedingung fällt die Bedingung (18a) weg.

Tabelle I.

U = 60 kV, U ₀ = 9,4 kV, P ₀ = 10 kW, g = $\frac{P_0}{U_0^2} = 1,13 \cdot 10^{-4}$				
	a) allgem. Fall	b) b = ∞	c) b = y ₁ + y ₂	
ϵ =	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	∞	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	μF
C ₂ = $\frac{y_2}{\omega}$ =	0,188	0,828	0,244	μF
(Gl. 34) τ =	0,447	2,835	0,492	10 ⁻⁴
(Gl. 37) cos φ =	0,249	0,0625	0,226	
tg φ =	3,89	16,0	4,315	
(Gl. 38) η =	0,157	0,0625	0,151	

Die günstigsten Werte von η liegen in den Fällen a) und c) vor. Praktisch wird man natürlich dem Fall c) den Vorzug 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 ₀ =	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 η und cos φ 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
$\eta = \frac{P_0}{P_t}$ =	0,156	0,063	0,147	
ctg φ = $\frac{P_0}{P_{b1}}$ =	0,254	0,063	0,232	
cos φ =	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 Admittanzmaßstab: 1 cm = 0,15 · 10⁻⁴. Demnach OA = g = $\frac{1,13}{0,15} = 7,53$ cm. Kreis um OA. y = 0,71 · 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 O₃. Somit b = OO₃ = 6,07 · 0,15 · 10⁻⁴ =

0,91 · 10⁻⁴. Ziehen den Admittanzkreis K mit Durchmesser OO₃; O ist der Leerlaufpunkt P₀, und O₃ der Kurzschlusspunkt P_k. Ziehen Bogen um O mit Radius ε · y = 0,94 · 0,71 · 10⁻⁴ = 0,668 · 10⁻⁴ entsprechend 4,45 cm und zu diesem Bogen Tangenten von P aus. Eine Tangente schneidet die Abszisse in O₁. Es ist O₁O = 4,72 cm, und somit y₁ + y₂ = 0,708 · 10⁻⁴. y₁ und y₂ ergeben sich aus O₁O₂ und O₂O zu 0,118 · 10⁻⁴ und 0,59 · 10⁻⁴. Die andere Tangente schneidet die Abszisse ausserhalb der Zeichnung und ergibt grössere Werte für y₁ und y₂, die weiter nicht interessieren.

Wir zeichnen jetzt den Kreis K₁, der zu K mit der Inversionspotenz P = OO₁ · O₁O₂ = 4,72 · 0,79 = 3,73 invers ist. Der Leerlaufpunkt P₁₀ fällt mit O₂ zusammen und der Kurzschlusspunkt P_{1k} liegt $\frac{P}{O_1 P_k} = \frac{3,73^2}{1,35} = 2,76$ cm von O₁ entfernt. Der Kreis K₁ geht durch P₁₀ und P_{1k} und hat P₁₀P_{1k} als Durchmesser. Der Schnitt der Linie O₁P mit dem Kreis K₁ ergibt den Punkt P₁. Macht man O₁O = U = 60 kV, also 1 cm = 12,7 kV, dann ist U₂ = O₁P₁ = 1,18 · 12,7 = 15 kV und U₁ = P₁O = 4,5 · 12,7 = 57,2 kV. Macht man ferner im Dreieck O₃PO die Seite O₃O = U₂, d. h. 1 cm = 2,47 kV, so ist U₀ = O₃P = 3,8 · 2,47 = 9,4 kV und U_b = PO = 4,75 · 2,47 = 11,7 kV.

P₁O stellt auch I₁, und P₁S stellt I₁ · cos φ dar. Der Strommaßstab lässt sich bestimmen aus

I₁₀ = U₁₀ · y₁ = 50 · 10³ · 0,118 · 10⁻⁴ = 0,59 A = P₁₀O = 3,93 cm zu 1 cm = 0,15 A. Daraus folgt I₁ = P₁O = 4,5 · 0,15 = 0,675 A und I₁ · cos φ = P₁S = 1,11 · 0,15 = 0,167 A. Der Leistungsmaßstab ist 1 cm = 0,15 · U = 0,15 · 60 = 9 kW und somit: P₀ = P₁S = 1,11 · 9 = 10 kW und

P_{b1} = SO = 4,35 · 9 = 39,15 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 Admittanz trägt man im Maßstabe: 1 cm = 0,3 · 10⁻⁴ ein. OA = OP = 3,77 cm, entsprechend dem Werte g. ε · y = 1,062 · 10⁻⁴, demnach OQ = 3,54 cm. Kreis K₁ geht durch O₁ und O₂ mit y₁ als Durchmesser.

Im Spannungsdreieck O₁P₁O entspricht O₁O = 10,4 cm der Spannung U = 60 kV, demnach 1 cm = 5,76 kV.

U₂ = U₀ = O₁P₁ = 1,63 · 5,76 = 9,4 kV.

U₁ = P₁O = 8,9 · 5,76 = 51,2 kV.

I₁₀ = U₁₀ · y₁ = 50 · 10³ · 0,52 · 10⁻⁴ = 2,6 A = O₂O = 8,67 cm, demnach: 1 cm = 0,3 A.

I₁ = 8,9 · 0,3 = 2,67 A und

I₁ · cos φ = P₁S = 0,56 · 0,3 = 1,68 A.

Für die Leistungen gilt: 1 cm = 0,3 · U = 0,3 · 60 · 10³ = 18 kW, daraus:

P₀ = P₁S = 0,56 · 18 = 10,1 kW und

P_{b1} = SO = 8,85 · 18 = 159 kVA.

Fig. 6 stellt den Fall dar, bei welchem b = y₁ + y₂ ist. Auch hier ist das Diagramm wesentlich einfacher als im Falle a). Der Admittanzmaßstab sei gewählt mit 1 cm = 0,15 · 10⁻⁴. ε · y = y = 0,71 · 10⁻⁴, entsprechend 4,73 cm. K₁ ist eine Gerade, die durch O₂, senkrecht zur Abszisse, geht. Im Spannungsdreieck O₁P₁O ist O₁O = 6,07 cm = 60 kV, demnach 1 cm = 9,89 kV. Somit ist U₂ = O₁P₁ = 1,52 · 9,89 = 15 kV und U₁ = P₁O = 5,23 · 9,89 = 51,6 kV.

Im Dreieck O₃PO ist O₃O = 6,07 cm = 15 kV, demnach 1 cm = 2,47 kV. Somit U₀ = O₃P = 3,8 · 2,47 = 9,4 kV und U_b = PO = 4,7 · 2,47 = 11,7 kV.

Da U₁₀ = 60 - 9,4 = 50,6 kV ist, ist

I₁₀ = 50,6 · 0,143 · 10³ · 10⁻⁴ = 0,724 A = 5,1 cm,

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

I₁ = 5,23 · 9,141 = 0,74 A.

I₁ · cos φ = P₁S = 1,18 · 0,141 = 0,166 A.

Ferner: 1 cm = 60 · 10³ · 0,141 = 8,46 kW, und somit: P₀ = 1,18 · 8,46 = 10 kW und P_{b1} = 5,11 · 8,46 = 43,2 kVA (in der Tabelle 43,0 kVA).