

**Zeitschrift:** Bulletin de l'Association suisse des électriciens  
**Herausgeber:** Association suisse des électriciens  
**Band:** 39 (1948)  
**Heft:** 23

**Artikel:** Die Wirtschaftlichkeit von Drehstrom-Hochleistungsübertragungen mit Betriebsspannungen von 110...440 kV  
**Autor:** Senn, E.  
**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-1057972>

### **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:** 18.01.2025

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

Toutefois, nous pensons que notre approximation s'écarte moins que l'autre de la réalité, car il ne nous semble pas juste que l'onde pour  $T_s \geq 0,5 T_K$ , entre sans déformation dans l'enroulement [5]. En effet, comme nous l'avons vu plus haut, l'onde traverse le réseau récurrent en subissant *toujours* (sauf pour  $\alpha = \infty$ ) une déformation, quand la tension de choc a un front de durée nulle; quelle que soit la forme de l'onde, le résultat est certainement le même.

Au point de vue pratique, l'examen des deux solutions, ainsi que la comparaison des mesures de Wellauer [5] prouve que les résultats obtenus par les deux méthodes concordent d'une manière satisfaisante<sup>9)</sup>.

<sup>9)</sup> Norris [7], dans son travail «The lightning strength of power transformers», paru après l'envoi en rédaction du présent article, étudie la même question, en suivant la théorie des ondes mobiles. Il obtient une solution, laquelle, bien que d'approximation plus grossière, concorde passablement avec celle de Wellauer [5] et avec la nôtre.

## Bibliographie

- [1] Wagner, Karl Willy: Das Eindringen einer elektromagnetischen Welle in eine Spule mit Windungskapazität. Elektrotechn. u. Maschinenbau t. 33(1915), n° 8, p. 89...92, et n° 9, p. 105...108.
- [2] Fraenckel, Alfred: Theorie der Wechselströme. Berlin, 1930. p. 254 ff.
- [3] Einhorn, Heinz: Einschwingvorgänge in Spulen. Diss. TH Berlin, 1933.
- [4] Rüdenberg, Reinhold: Performance of Travelling Waves in Coils and Windings. Electr. Engng. Trans. Sect. t. 59(1940), p. 1031 ff.
- [5] Wellauer, Max: Die Spannungsbeanspruchung der Eingangsspulen von Wicklungen beim Auftreten von Stoßspannungen verschiedener Steilheit. Bull. ASE t. 38 (1947), n° 21, p. 655...665.
- [6] Flegler, E.: Spule und Wanderwelle. Arch. Elektrotechn. t. 25(1931), n° 1, p. 35...72.
- [7] Norris, E. T.: The lightning strength of power transformers. J. Instn. Electr. Engrs., Part II, t. 95(1948), n° 46, p. 389...401.

Adresse de l'auteur:

Dr. Ing. F. Jalla, Bahnhaldenstrasse 4, Zürich 52.

## Die Wirtschaftlichkeit von Drehstrom-Hochleistungsübertragungen mit Betriebsspannungen von 110...440 kV\*)

Von E. Senn, Innsbruck

621.315.1.025.3

*Durch eine systematische Untersuchung im Bereiche der Betriebsspannungen von 110...440 kV und zusammenhängend damit im Bereiche der praktisch in Frage kommenden Leiterquerschnitte soll eine übersichtliche Darstellung der Kosten von Hochleistungsübertragungen erreicht werden. Daraus ergibt sich auch ein übersichtliches Verfahren zur Ermittlung der wirtschaftlichsten Ausführung.*

*Une étude systématique du domaine des tensions d'exploitation de 110 à 440 kV et des sections de conducteurs entrant pratiquement en considération doit permettre de se rendre nettement compte du coût des lignes de transport d'énergie électrique de grande puissance et de déterminer plus facilement quelle est l'exécution la plus économique.*

### Allgemeines

Wir gehen bei diesen Untersuchungen von einer Grundthese aus, die Piloty [1]<sup>1)</sup> folgendermassen formulierte:

«Wirtschaftliche Untersuchungen von Fernleitungsprojekten beziehen sich stets in erster Linie auf die Ermittlung der Fernleitungskosten. Diese setzen sich zusammen aus den Anlagekosten sowie aus den Kosten für die Verluste und verursachen eine Verteuerung der Einheit der elektrischen Arbeit.»

Daher muss man folgerichtig die jährlich anfallenden Kosten für die Anlage und für die Verluste ermitteln und durch die jährlich übertragene Energiemenge dividieren.

Es ist zuerst festzulegen, auf welche Grundlagen wir alle Berechnungen beziehen wollen.

Unsere Wahl fiel darauf, die übertragene Leistung (Höchstleistung) als Bezugsgrösse zu wählen, denn die Anlagekosten hängen direkt mit der übertragenen Leistung überhaupt nicht zusammen und die Verlustleistungen lassen sich daraus schnell berechnen, ebenso die übertragene Energiemenge, wenn die Vollastbenutzungsdauer bekannt ist. Weil aber gerade die Vollastbenutzungsdauer, bei der

die gleichen Verluste auftreten wie beim tatsächlichen Belastungsverlauf, sehr schwer im vorhinein festzulegen ist, unterteilen wir die Rechnung in zwei Arbeitsgänge. Im ersten Arbeitsgang stellen wir die *billigste* überhaupt mögliche Leitungsausführung in Abhängigkeit von der Übertragungsleistung fest; im zweiten Arbeitsgang nehmen wir eine bestimmte Vollastbenutzungsdauer an (z. B. 12-Studentag) und ermitteln die Fernleitungskosten pro übertragene Kilowattstunde. Ändert sich die Vollastbenutzungsdauer, so lässt sich dies, wie wir sehen werden, durch eine einfache Änderung des Maßstabes berücksichtigen; man braucht aber diese unsichere Grösse nicht während des ganzen Rechnungsganges mitzuschleppen.

Die angeführten Überlegungen gelten für den Fall, dass von einem Kraftwerk die Energie über eine einzige Leitung fortgeschafft wird. Handelt es sich bei der Errichtung einer Leitung um die Erweiterung eines bestehenden Netzes, so sind noch andere Überlegungen nötig, die von Fall zu Fall verschieden sind. Beispielsweise wird durch eine neue Leitung meistens nicht nur ein neues Absatzgebiet erschlossen, sondern es werden im ganzen bessere Preise erzielt, besonders wenn durch die neue Leitung die Abhängigkeit von einem einzigen Abnehmer aufgehoben ist. Auf derartige Probleme soll hier nicht eingegangen werden, sondern wir

\*) Nach einem Vortrag des Verfassers im Österreichischen Ingenieur- und Architekten-Verein Wien.

<sup>1)</sup> Siehe Literatur am Schluss.

wollen die Kardinalfrage beantworten: Welches ist die billigste Leitung?

Die folgenden Untersuchungen erstrecken sich systematisch über einen Bereich von 110...440 kV Betriebsspannung und über Leiterquerschnitte von 95...550 mm<sup>2</sup> Kupfer, bzw. einem leitwertgleichen Aluminium-Querschnitt. Der Leiterwiderstand ändert sich damit zwischen etwa 0,2 und 0,035 Ohm/km.

**Ermittlung der Anlagekosten und Verlustkosten**

Die Anlagekosten einer Leitung wachsen mit grösser werdendem Querschnitt, und die Verluste nehmen ab. Es gilt, den optimalen Punkt zu finden. Fig. 1 zeigt das bekannte Bild, wie die Anlagekosten vom Querschnitt der Leitung abhängen. Über dem Querschnitt sind die für Betriebsspannungen von 110 bzw. 220 kV von Piloty genannten Preise in RM aus dem Jahre 1932 aufgetragen; die Preise stammen somit aus einer Zeit der freien Wirtschaft und können daher leicht auf andere Währungen umgerechnet werden. Im folgenden seien weiterhin die RM-Preise aus dem Jahre 1932 verwendet<sup>2)</sup>.

Als Leitermaterial ist Kupfer bzw. ein leitwertgleicher Aluminium-Querschnitt angenommen. Der Preis für die 440-kV-Übertragung stammt aus einer späteren Zeit und kann nur als Näherungswert be-

<sup>2)</sup> Da uns die Clichés aus Österreich zur Verfügung gestellt wurden, verzichteten wir, sie auf Fr. und Rp. umzuzeichnen; wir haben auch der Einfachheit halber die hier ungebrauchlichen Bezeichnungen übernommen, z. B. qmm, statt mm<sup>2</sup>. Red.

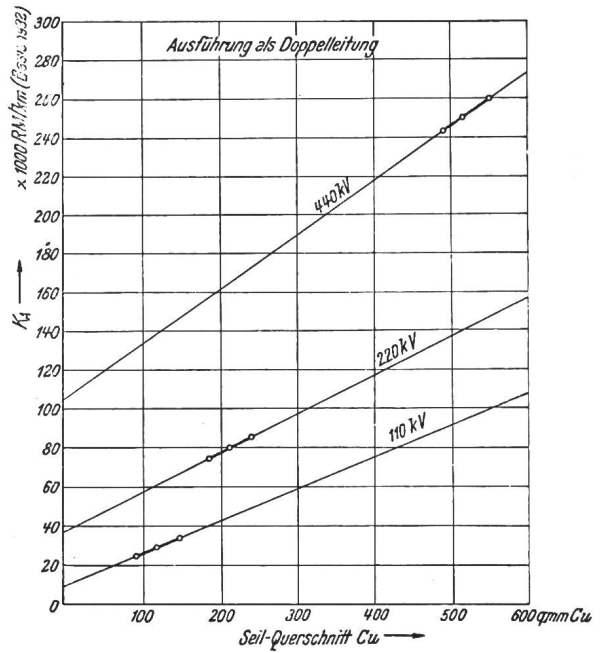


Fig. 1  
Anlagekosten von Hochspannungsleitungen in Abhängigkeit vom Querschnitt

trachtet werden, weil bisher keine 440-kV-Übertragung erstellt wurde.

Die jährlichen Kosten, die mit der Anlage zusammenhängen, werden üblicherweise in Prozenten vom Anlagewert ausgedrückt; in folgendem Beispiel wählen wir hierfür 12%. Die mit den Verlusten zusammenhängenden Kosten können mit Hilfe der Fig. 2 schnell berechnet werden. Zu jeder Wirk-

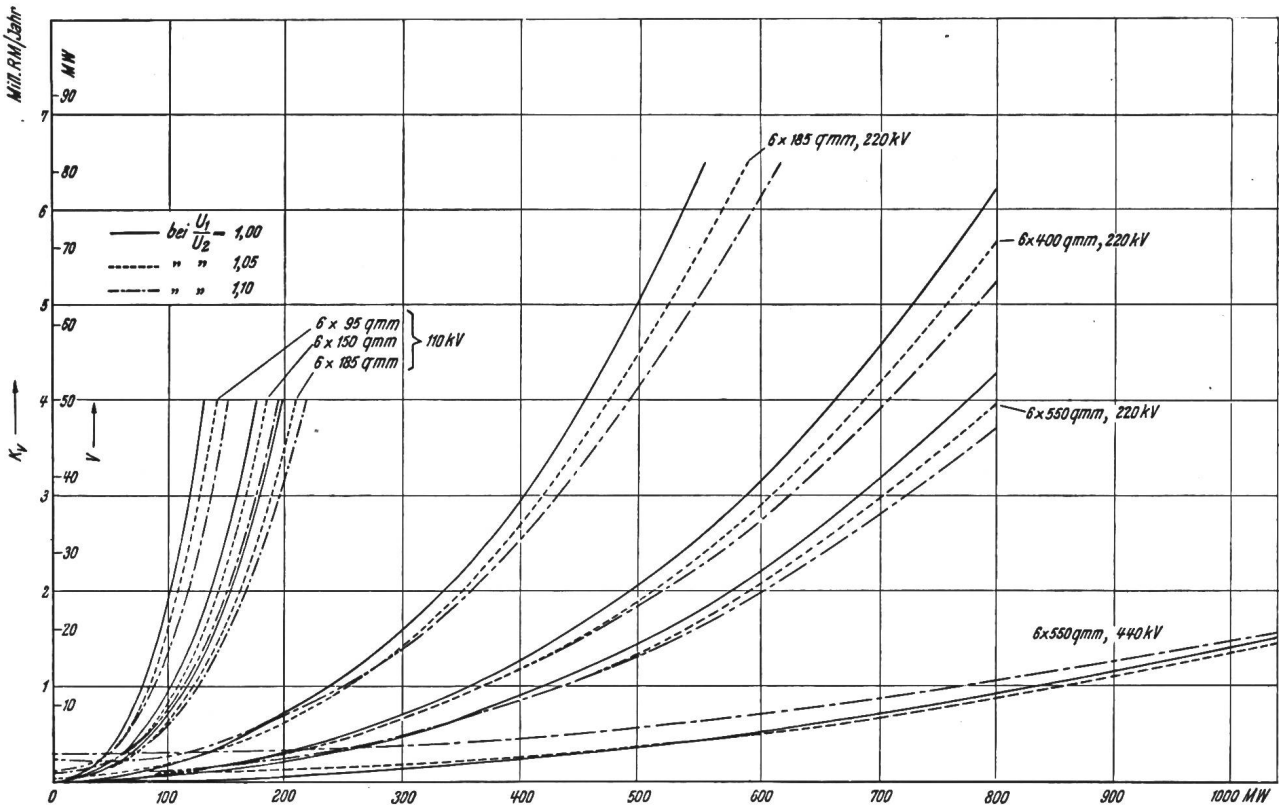


Fig. 2  
Übertragungskosten verschiedener Hochspannungsleitungen (von 200 km Länge) in Abhängigkeit von der Belastung

leistung am Leitungsende sind die Verlustleistungen für die bei verschiedenen Betriebsspannungen praktisch ausgeführten Leiterquerschnitte aufgetragen. Sie wurden mit Hilfe einer von Pohlhausen [2] aus den exakten Leitungsgleichungen abgeleiteten Formel berechnet, und zwar für verschiedene Spannungsverhältnisse zwischen Leitungsanfang ( $U_1$ ) und Leitungsende ( $U_2$ ). Im wesentlichen geht die Leitungslänge nicht in die Wirtschaftlichkeitsrechnung ein, weil die Anlage- und Verlust-Kosten proportional mit der Leitungslänge wachsen. In geringem Maße werden die Verluste durch die zur Spannungshaltung nötige «Erregung» der Leitung (Blindleistungszufuhr) beeinflusst, die etwas von der Leitungslänge abhängen. Diesen Betrachtungen wurde eine Leitungslänge von 200 km zu Grunde gelegt, weil für Spannungen von 110 kV kaum grössere Übertragungsweiten in Frage kommen und weil sehr oft auch Leitungen höherer Betriebsspannungen Zwischenstationen ungefähr in dieser Entfernung aufweisen.

Die in der Fig. 2 aufgetragenen Verlustleistungen müssen gewissermassen von einem eigenen Kraftwerk aufgebracht werden. Die Kosten dieses Kraftwerkes sind von Fall zu Fall voraus berechenbar. Für unser Beispiel nehmen wir an, dass die Jahreskosten des Werkes 80 RM/kW betragen, was etwa einem Anlagewert von 800 RM/kW entspricht (auf die gleichen Jahreskosten käme man, wenn das Kraftwerk eine Vollastbenützungszeit von 4000 h hat und die Kilowattstunde 2 Pfennig kostet; alles

wiederum RM-Preise aus dem Jahre 1932). Bei Wasserkraftwerken kommen zu diesen vom Anlagewert abhängigen Kosten keine weiteren Ausgaben für die laufende Energieerzeugung, wohl aber bei Wärmekraftwerken für den Brennstoff. Dafür liegen die Anlagekosten bei Wärmekraftwerken etwas tiefer als bei Wasserkraftwerken, so dass sich beide Einflüsse im wesentlichen ausgleichen.

In Fig. 2 ist auf der Ordinate auch ein entsprechender Maßstab für die Verlustkosten eingetragen.

### Ermittlung der Jahreskosten

Addiert man die Jahreskosten für die Leitungsanlage  $K_A$ , die aus der Fig. 1 mit 12% berechnet wurden, und die Jahreskosten der Verluste  $K_V$  aus Fig. 2, so entsteht Fig. 3. Auf der Abszisse sind wiederum die Leistungen in MW und auf der Ordinate die Kosten pro 200 km aufgetragen. Man erkennt aus Fig. 3, warum und bei welcher Leistung man von einem Querschnitt auf den anderen und von einer Betriebsspannung auf die andere übergehen soll. Man geht auf einen grösseren Querschnitt über, wenn man die Verluste und dadurch die Jahreskosten wesentlich vermindern kann. Das gleiche gilt für den Übergang auf eine höhere Betriebsspannung. Man sieht z. B., dass ein Querschnitt von 185 mm<sup>2</sup> bei einer Betriebsspannung von 110 kV keine wesentliche Verbilligung bringt. Man wird daher diesen Querschnitt erst bei 220 kV Betriebsspannung anwenden. Die gleiche Überlegung gilt für

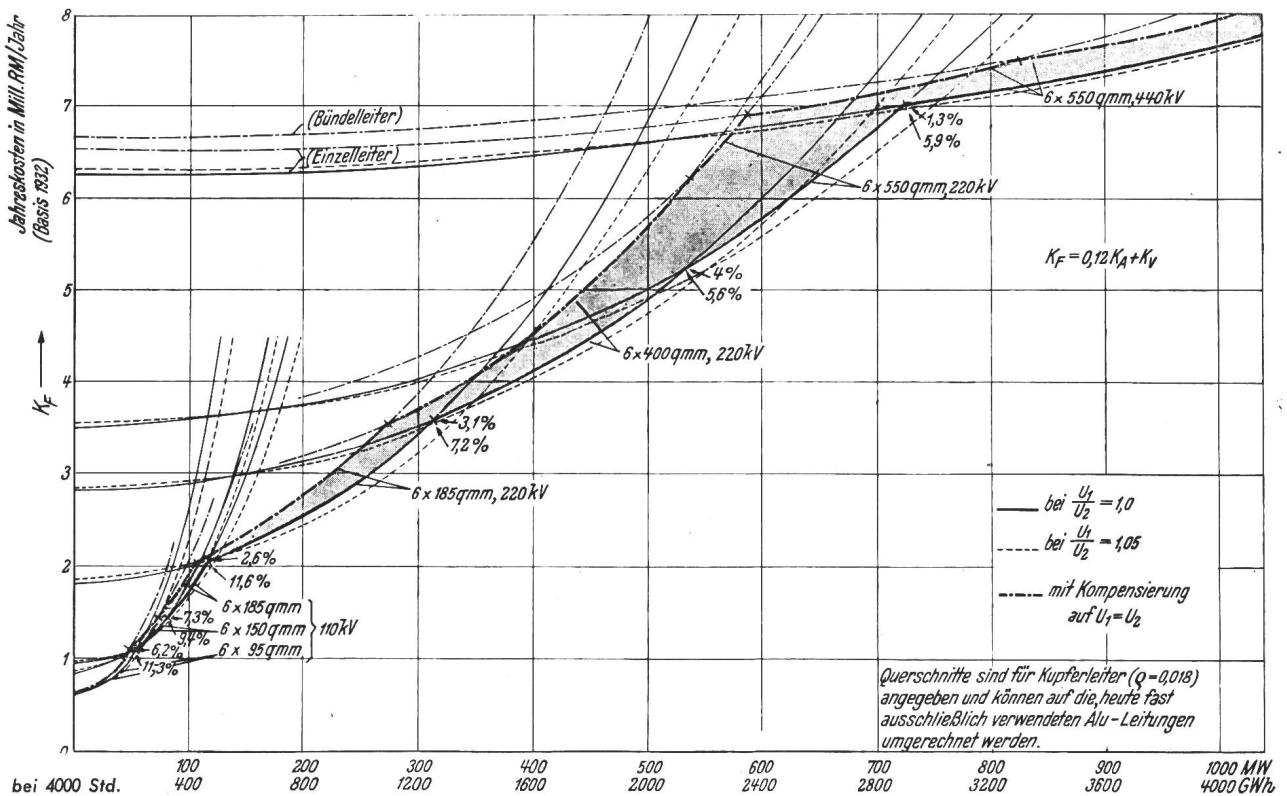


Fig. 3

Vergleich mehrerer Hochspannungsleitungen (von 200 km Länge) in bezug auf die wirtschaftlichste übertragbare Leistung (Doppelleitungen)

Ermittlung der Betriebsspannung und der Leiterausführung in Abhängigkeit von der übertragenen Leistung

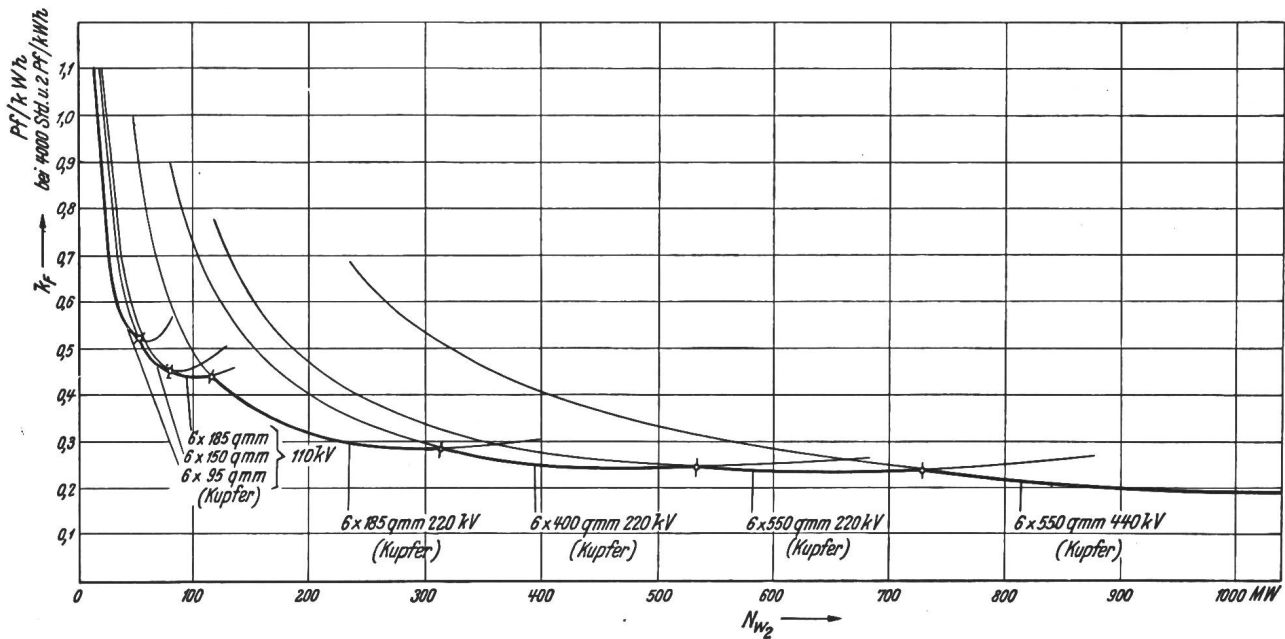


Fig. 4  
Übertragungskosten verschiedener Hochspannungsleitungen (von 200 km Länge) in Abhängigkeit von der Belastung

einen Querschnitt von 550 mm<sup>2</sup> beim Übergang von 220 kV auf 440 kV Betriebsspannung.

Als *Faustregel* kann man aus der für mittlere Verhältnisse gezeichneten Fig. 3 für die Bereiche der einzelnen Betriebsspannungen sich merken:

- 110-kV-Doppelleitung bis rund 100 MW übertragene Wirkleistung;
- normale 220-kV-Doppelleitung bis rund 300 MW übertragene Wirkleistung;
- verstärkte 220-kV-Doppelleitung bis rund 600 MW übertragene Wirkleistung;
- 440-kV-Doppelleitung über rund 600 MW übertragene Wirkleistung.

Für die Punkte, bei welchen man auf andere Betriebsspannungen und andere Querschnitte übergeht, sind in Fig. 3 die Verluste pro 200 km in Prozenten der übertragenen Wirkleistung vermerkt (kleine Pfeile). Es sei noch darauf hingewiesen, dass die Jahreskosten mit wachsender Leistung und entsprechendem Querschnitt langsamer als proportional zunehmen.

Auf der Abszisse kann man unter der Annahme von verschiedenen Vollastbenützungsstunden auch die übertragene Energiemenge anschreiben. Bei 4000 Benützungsstunden pro Jahr, d. h. bei rund 12-stündigem Betrieb pro Tag, können ganz beachtliche Energiemengen übertragen werden. Bei 1000 Benützungsstunden im Jahr, was bei ausgesprochenen Spitzenwerken der Fall ist, sinkt die übertragene Energiemenge entsprechend auf den vierten Teil ab.

Damit kommen wir zum zweiten erwähnten Arbeitsgang. Wir gehen von einer Vollastbenützungszeit von 4000 h aus und dividieren die Anlagekosten durch die zu jeder Leistung gehörige Energiemenge. Daraus erhalten wir Fig. 4 für die Fernleitungskosten pro Kilowattstunde und 200 km Leitungslänge. Wie bereits erwähnt, lässt sich die Vollastbenützungsdauer, bei der die gleichen Verluste auf-

treten wie bei der tatsächlichen Belastung, sehr schwer im voraus bestimmen. Die Fernleitungskosten pro Kilowattstunde ändern sich in Fig. 4 im gleichen Verhältnis wie die wirkliche Benützungsdauer zur angenommenen Benützungsdauer von 4000 h, d. h. der Ordinaten-Maßstab der Fig. 4 ist im gleichen Verhältnis zu ändern.

Damit haben wir die gestellten Fragen nach der billigsten Leitungsausführung und nach der Höhe der Fernleitungskosten für die nackte Leitung beantwortet.

Fig. 3 und 4 zeigen, dass die zu wählende Ausführung im wesentlichen von der zu übertragenden Leistung abhängt. Die Figuren gelten für die erwähnten mittleren Annahmen und für eine nackte Leitung. Sie können aber schnell auch auf andere Verhältnisse umgezeichnet werden, z. B. wenn die Kosten der Zwischenstationen und Transformatorstationen zu berücksichtigen sind. Wissenswert ist, wie sich die Jahreskosten ändern, wenn die zur Spannungshaltung nötigen Blindleistungs-Apparate (Drosselspulen, Synchronmaschinen) berücksichtigt werden. In Fig. 3 sind strichpunktiert die Jahreskosten für den Fall eingetragen, dass die Leitung auf gleiche Spannung am Anfang und Ende «erregt» wird; zugrundegelegt wurden folgende Preise pro kVA: Drosselspulen: für 110 kV 4 RM; für 220 kV 6 RM; für 440 kV 9 RM. Synchronmaschinen: 30 RM.

Man entnimmt der Fig. 3, dass bei Berücksichtigung der «Erregung» die Übergangspunkte auf höhere Betriebsspannungen bei etwa 20 % kleineren Übertragungsleistungen liegen.

Wie Piloty in einem ähnlichen Zusammenhang bemerkt [1], hat es keinen grossen Zweck, die von der nackten Leitung herrührenden Fernleitungskosten dadurch zu berichtigen, dass man die Kosten für Blindleistungsmaschinen dazuzählt, weil man allgemein schwer feststellen könne, welcher Teil da-

von auf das Konto der Energieübertragung gesetzt werden muss. Von Fall zu Fall ist zu untersuchen, welcher Zuschlag hierfür zu machen ist.

Die grossen Querschnitte, die für eine 440-kV-Übertragung in Frage kommen, dürften wohl nur als Bündelleiter ausgeführt werden. Der grosse Vorteil des Bündelleiters liegt in der leichten Ausführbarkeit grosser Querschnitte. Dazu kommt noch das günstige Verhalten in bezug auf die Koronaverluste, was bei 440-kV-Übertragungen einen ausschlaggebenden Einfluss auf die Betriebsführung hat [3].

Die Verluste für eine Leitung von 550 mm<sup>2</sup> Leiterquerschnitt wurden im vorstehenden für eine normale Freileitungsausführung mit Einzelleiter berechnet, nicht für eine Anordnung mit Bündelleiter, weil, wie sich nachweisen lässt, die Verluste von beiden Anordnungen nahezu gleich gross sind.

Aus Fig. 3 sieht man auch, dass nicht die natürliche Leistung die Übertragungsfähigkeit und vor allem die Wirtschaftlichkeit festlegt, sondern der ohmsche Widerstand und die damit zusammenhängenden Anlage- und Verlustkosten.

### Zusammenfassung

An Hand der Fig. 3 und 4 wurde ein Verfahren zur raschen Ermittlung der wirtschaftlichsten Ausführung von Hochspannungsleitungen angegeben. In Abhängigkeit von der zu übertragenden Höchst-

leistung kann der Querschnitt und die Betriebsspannung gewählt werden. Man sieht, wie sich die einzelnen Querschnitte und Betriebsspannungen zwangsläufig aneinanderreihen.

Die Wahl der Betriebsspannung und des Querschnittes ist im wesentlichen *unabhängig von der Leitungslänge*. Sie wird etwas durch die Zahl der Zwischenstationen und durch die Kosten der «Erregung» der Leitung beeinflusst. Zur überschlägigen Beurteilung ist eine Faustregel angegeben.

Ausser den wirtschaftlichen Überlegungen muss man bei Leitungsprojekten eine Reihe anderer Fragen, z. B. Stabilität, Erwärmung und anderes berücksichtigen; sie gehören jedoch nicht in den Rahmen dieser Ausführungen. — Es sei eindringlich darauf verwiesen, welche grosse Wichtigkeit hohe Betriebsspannungen haben, wenn es gilt, grosse Netze stabil miteinander zu verbinden.

### Literatur

- [1] *Piloty, H.*: Wirtschaftlichkeit der Dreh- und Gleichstromübertragung, in R. Rüdberg, Hochleistungsübertragung, 1932, S. 305.
- [2] *Pohlhausen, K.*: Theorie der langen Leitungen, in R. Rüdberg, Hochleistungsübertragung, 1932.
- [3] *Senn, E.*: Der Koronareststrom und seine Löschung, Arch. Elektrotechn. 37 (1943), S. 444.

Adresse des Autors:

Dr. E. Senn, Direktor der Tiwag, Innsbruck (Österreich).

## Die praktische Berechnung des Spannungsabfalls von Wechselstromleitungen

Von P. Widmer, St. Gallen

621.3.015.1 : 621.315.1

*Der Autor, von der Tatsache ausgehend, dass die Berechnung des Spannungsabfalls von Wechselstromleitungen als vektorielles Problem relativ kompliziert ist, arbeitete für praktische Zwecke zwei Verfahren aus, welche die Schwierigkeiten und Fehlschlüsse vermeiden, die durch vereinfachende Annahmen entstehen, trotzdem aber übersichtlich bleiben. Das eine ist ein analytisches Verfahren, das selbst nicht ganz genau ist, weil es ohne gewisse Vereinfachungen nicht auskommt, für überschlagsmässige Rechnungen bei kleinem Spannungsabfall und konstantem Leistungsfaktor aber ausreicht. Das andere ist ein graphisches Verfahren, das theoretisch einwandfreie Ergebnisse erzielt.*

*L'auteur constate tout d'abord que le calcul de la chute de tension le long d'une ligne à courant alternatif est, comme problème vectoriel, assez compliqué. Il se base sur ce fait pour élaborer deux procédés à l'usage des praticiens, qui restent très clairs tout en réduisant les difficultés et les erreurs que causent des hypothèses simplificatrices. L'un de ces procédés est analytique, mais n'est pas encore parfaitement exact, ne pouvant éviter totalement certaines de ces simplifications. Il suffit toutefois amplement pour un calcul d'approximation dans le cas où la chute de tension est faible et où le facteur de puissance reste constant. L'autre procédé est graphique et fournit des résultats théoriquement exacts.*

### 1. Einleitung

Die Berechnung des Spannungsabfalls von Wechselstromleitungen ist ein vektorielles Problem und deshalb für die praktische Rechnung nicht durchwegs geeignet. Dies gilt speziell dann, wenn die Spannungsabfälle für einen bestimmten Bereich der Leistungen und des Leistungsfaktors gesucht werden. Um den bei dieser Rechnung auftretenden Schwierigkeiten aus dem Weg zu gehen, ist man oft versucht, den Spannungsabfall lediglich auf Grund des absoluten Betrages der Impedanz ohne Berücksichtigung der Richtung zu rechnen, d. h. die absolute Grösse des Spannungsabfall-Vektors mit der Spannung zu vergleichen. Dieses Verfahren ergibt aber in den meisten Fällen zu grosse Werte, die für die Praxis kaum brauchbar sind. Geometrische Hilfsmittel, bei welchen die Spannungsabfälle auf Schiebern eingestellt und geometrisch zu den Spannungen addiert werden, vereinfachen die Rechnung,

geben aber keine Übersicht bei Veränderung der Leistung, da für jeden Wert der Leistung die Schieber neu eingestellt werden müssen. Zur Erläuterung dieses Problems sei nur die Aufgabe erwähnt, die maximalen Leistungen in Funktion des Leistungsfaktors für bestimmte Grenzbedingungen des Spannungsabfalls und der Verluste zu ermitteln.

Im folgenden werden zwei Verfahren zur Berechnung des Spannungsabfalls gezeigt, welche die erwähnten Schwierigkeiten vermeiden. Das eine, analytische Verfahren, das allerdings noch einige Ungenauigkeiten infolge der für die praktische Rechnung nötigen Vereinfachungen aufweist, kann für überschlagsmässige Rechnungen bei kleinen Spannungsabfällen und vorzugsweise konstantem Leistungsfaktor mit Vorteil angewendet werden. Das zweite, graphische Verfahren, ergibt theoretisch einwandfreie Resultate. Es folgt der normalen vektoriellen Darstellung und bietet deshalb grundsätz-