

Badische Landesbibliothek Karlsruhe

Digitale Sammlung der Badischen Landesbibliothek Karlsruhe

**Die elektrischen Gleichstromleitungen mit Rücksicht auf
ihre Elastizität**

Teichmüller, Joachim

Stuttgart, 1898

VI. Erweiterung des Verteilungsgebietes

[urn:nbn:de:bsz:31-289940](https://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:bsz:31-289940)

Bezirke zu einem vereinigt werden, eine Komplikation der Rechnung ist hiermit nicht verbunden (vergl. § 93). Sind beide Punkte, die mit einander verbunden werden, Speisepunkte, so bildet die neue Leitung einen Bezirk für sich.

3. Die Verlegung einer neuen Ausgleichleitung. Aendert sich die Belastung eines Netzes im Laufe der Zeit so, dass die Spannung an einem Speisepunkte sehr niedrig ist, während sie an benachbarten Speisepunkten normal oder höher als normal ist, so muss der Punkt mit einem oder einigen benachbarten Punkten durch neue Ausgleichleitungen verbunden werden. Die Berechnung dieser Leitungen erfolgt genau in der in § 105 und § 106 angegebenen Weise unter Benutzung der dort abgeleiteten Formeln (67) und (78). Die Grössen ϵ'_{II} und ϵ'_{III} stellen jetzt die mit Hilfe der Prüfdrähte thatsächlich beobachteten Spannungsunterschiede zwischen den Speisepunkten dar. Sollen zufällig vorrätige Kabel benutzt werden, so treten in den Gleichungen (67) und (78) die Grössen ϵ_{II} und ϵ_{III} als einzige Unbekannte auf. Sie können also berechnet werden und geben dann an, auf welchen Wert die Spannungsunterschiede durch Verwendung der vorhandenen Kabel herabgedrückt werden können.

VI. Erweiterung des Verteilungsgebietes.

126. Wir sind nunmehr in den Stand gesetzt, ein Leitungsnetz für ein vorliegendes Bedürfnis richtig zu berechnen. Es ist klar, dass ein Netz um so teurer wird, je grösser unter sonst gleichen Verhältnissen das Gebiet ist, auf das ein bestimmter Effekt verteilt werden soll, denn mit Vergrösserung des Verteilungsgebietes wächst sowohl die Länge der Speise- als auch der Verteilungsleitungen oder die Zahl der Speiseleitungen, und es muss daran liegen, die Kosten des Netzes dividirt durch den Gesamteffekt möglichst niedrig zu halten. Viele der vorangegangenen Rechnungen sind schon mit Rücksicht hierauf durchgeführt worden. Aber auch wenn man die Ergebnisse dieser Rechnungen bei der Berechnung des Netzes sorgfältig berücksichtigen würde, würde doch bald eine Grenze erreicht sein, über die hinaus das Verteilungsgebiet nicht mehr vergrössert werden kann, wenn nicht die hohen auf 1 Watt bezogenen Anlagekosten des Netzes eine Rentabilität der Gesamtanlage von vornherein unmöglich machen sollen. Diese Grenze liegt bei Gebieten von etwa 600 m Radius.

Es muss deshalb nach weiteren Mitteln gesucht werden, die die Kosten des Netzes bei gegebenen Verhältnissen verringern oder, was dasselbe ist, das Verteilungsgebiet zu erweitern gestatten. Hierzu bieten sich zwei Mittel.

Die Schaltung mit versetzten Speisepunkten
(Gegenschaltung).

127. Wirkungsweise der Leitungen mit versetzten Speisepunkten.

Wäre das in Fig. 99 skizzierte Leitungsnetz so gezeichnet, dass für die positiven und die negativen Leitungen jedesmal besondere Striche gezogen wären, so würde sofort eine Unzweckmässigkeit der Anlage in die Augen springen, die darin besteht, dass die Speisepunkte des positiven und die des negativen Netzes an homologen Punkten liegen. Denn auf diese Weise muss der Spannungsverlust, wie sich aus Betrachtung der Figuren 34 und 68 ergibt, von den Speisepunkten aus in beiden Leitungen gleichmässig zunehmen, bis er da ein Maximum erreicht, wo er sowohl in der positiven als in der negativen Leitung seinen grössten Wert angenommen hat. Würde man statt dessen den Speisepunkt im negativen Netze mitten zwischen zwei Speisepunkte des positiven Netzes legen, so würde dadurch der maximale Spannungsverlust in den Verteilungsleitungen bedeutend verringert werden, oder es würde umgekehrt bei vorgeschriebenem Maximalverluste entweder der Querschnitt der Verteilungsleitungen kleiner oder bei demselben Querschnitte die Entfernung der Speisepunkte von einander grösser, die Zahl der Speiseleitungen also kleiner werden; die Kosten des Netzes werden somit verringert oder bei gleichen Kosten das Verteilungsgebiet erweitert. Ein genaueres Bild ergeben folgende Betrachtungen:

Erster Fall. Die Leitungen seien auf konstanten Querschnitt berechnet, die Stromentnahme sei auf die Leitung ihrer ganzen Länge nach gleichmässig verteilt. Die Kurve des Spannungsverlustes ist dann nach § 65 eine Parabel von der Gleichung

$$\epsilon_+ = \frac{\Sigma_1}{Q} l \left(1 - \frac{l}{2 \mathcal{L}_m} \right) \varrho, \dots \dots \dots (107)$$

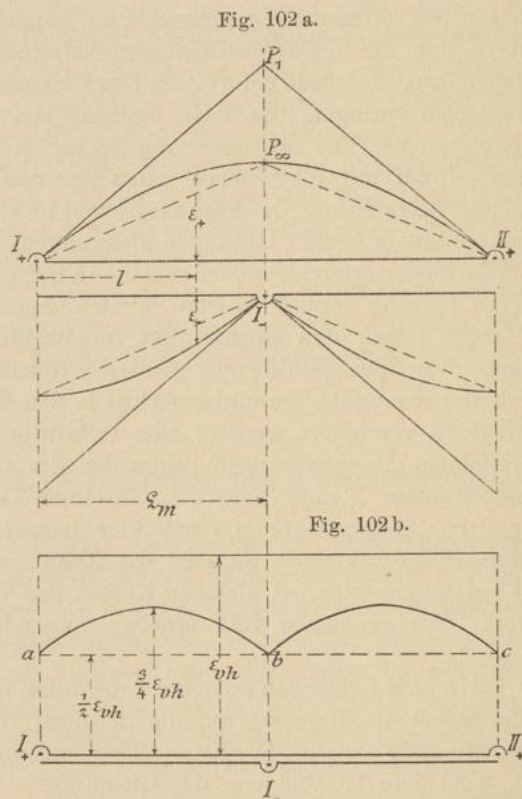
vergl. Gleichung (29) Seite 97. Hierin stellt ϵ_+ den Spannungsverlust in der einen (positiven) Leitung dar, wenn die Entfernung der beiden Speisepunkte von einander $= 2 \mathcal{L}_m$ ist. Der maximale Verlust in dieser Leitung, für $l = \mathcal{L}_m$ ist

$$\epsilon_m = \frac{1}{2} \frac{\Sigma_1 \mathcal{L}_m}{Q} \varrho \dots \dots \dots (108)$$

Liegt der negative Speisepunkt dem positiven homolog, so ist der gesamte maximale Verlust

$$\epsilon_{vh} = 2 \epsilon_m = \frac{\beta_1 \varrho_m}{Q} \varrho \dots \dots \dots (109)$$

Wendet man dagegen versetzte Speisepunkte in der in Fig. 102a gezeichneten Weise an, so verändert der maximale Spannungsverlust sowohl seinen Ort als seine Grösse. Es ist nämlich dann in jedem



Punkte der Leitung zu dem aus Gleichung (107) folgenden Spannungsverluste der Spannungsverlust in der negativen Leitung hinzuzuaddieren, der den Wert

$$\epsilon_- = \frac{\beta_1}{Q} (\varrho_m - l) \left(1 - \frac{\varrho_m - l}{2 \varrho_m} \right) \varrho \dots \dots \dots (110)$$

besitzt. Der von I+ aus gemessene Spannungsverlust wird also dargestellt durch die Gleichung

$$\epsilon_g = \epsilon_+ + \epsilon_- = \frac{\mathfrak{J}_1}{Q} \left[\frac{1}{2} \zeta_m + \frac{l}{\zeta_m} (\zeta_m - l) \right] \varrho \dots (111)$$

Auch diese Gleichung stellt wie die vorige eine Parabel dar, doch liegt jetzt der Scheitel mitten zwischen den beiden versetzten Speisepunkten. Der Scheitelpunkt ist gleichzeitig der Punkt des Maximums, das also für $l = \frac{\zeta_m}{2}$ eintritt (vergl. Fig. 102 b) und den Wert

$$\epsilon_{vg} = \frac{3}{4} \frac{\mathfrak{J}_1 \varrho}{Q}$$

hat. Es ist also

$$\epsilon_{vg} = \frac{3}{4} \epsilon_{vh} \dots \dots \dots (112)$$

Das heisst: Die Entfernung der Speisepunkte von einander darf bei Anwendung der Gegenschaltung im Verhältnis 4:3 vergrössert werden, wenn der maximale Spannungsverlust derselbe wie bei der Schaltung mit homologen Speisepunkten sein soll.

Zweiter Fall. Es werden gleiche Ströme in gleichen Abständen abgezweigt. Der Querschnitt der ganzen Leitung ist konstant.

Wie sich hier die Verhältnisse gestalten, ist nach einem Blick auf Fig. 51 leicht einzusehen. Nimmt man an, dass die dort dargestellten Kurven nur für die eine, die positive Leitung gelten sollen, und denkt sich nun in den verschiedenen Fällen, für $m = 1$, $= 2$ u. s. f., jedesmal eine genau gleiche Kurve addiert, so erhält man den wahren Spannungsverlust, und das tatsächliche Maximum ist offenbar immer

$$\epsilon_{vh} = 2 \epsilon_m$$

wenn unter ϵ_m die grössten in Fig. 51 erreichten Verluste verstanden werden. Denkt man sich die Figur aber für die Schaltung mit versetzten Speisepunkten gezeichnet, so erhält man Fig. 102 a; in dieser stellen die Parabel $I_+ P_\infty II_+$ und die gebrochene Linie $I_+ P_1 II_+$ die Grenzl意思en dar, zwischen denen alle anderen Kurven liegen müssen, wenn man m von 1 bis ∞ variiert.

Um die Spannungsverluste bei Gegenschaltung und bei homologer Schaltung mit einander vergleichen zu können, ist es besser die gleichen maximalen Spannungsverluste anzunehmen, es gelten dann die Parabel und die punktierte Kurve. Aus Fig. 102 b erkennt man, dass der Spannungsverlust für den Fall, dass die Stromentnahme von den Speisepunkten $I_+ II_+$ u. s. f. und von der Mitte zwischen denselben stattfindet, an allen Punkten gleich ϵ_m ist; es gelten dann in beiden Figuren die punktierten Geraden, und es ist

$$\epsilon_{vg} = \frac{1}{2} \epsilon_{vh} \dots \dots \dots (113)$$

Die Speisepunkte dürfen im günstigsten Falle also doppelt so weit von einander entfernt sein, wenn sie gegeneinander versetzt werden. Für den Fall, dass die Zahl der Abzweigstellen grösser wird, bleibt der Spannungsverlust an den positiven und negativen Speisepunkten immer derselbe — die Punkte *a*, *b* und *c* verändern ihren Ort nicht —, dagegen streben alle anderen Punkte von den punktierten Geraden weg zur Parabel.

Die Betrachtung soll uns gleichzeitig lehren, dass für den Fall des gleichen Querschnittes der Spannungsverlust, also auch die Nutzspannung ausschliesslich nur dann auf der ganzen Leitungslänge gleich sein kann, wenn nur von den (versetzten) Speisepunkten und keinem dazwischen liegenden Punkte Strom abgenommen wird.

Hiermit ist eine Anschauung widerlegt, die eine Zeit lang eine gewisse Rolle gespielt hat. In den ersten Jahren der praktischen Elektrotechnik glaubte man einen viel grösseren Wert auf die örtliche als auf die zeitliche Gleichmässigkeit im Leuchten der Glühlampen legen zu müssen, und das Bestreben, alle Lampen mit derselben Spannung brennen zu lassen, führte zu der in Fig. 103 gezeichneten Schaltung, die für einen offenen Leitungsstrang das bedeutet, was die Gegenschaltung der Speisepunkte in Netzen ist. Dass diese Schaltung bei Anwendung gleichen Querschnittes nicht, wie man geglaubt hat, gleiche Nutzspannungen erreichen lässt, ist durch die angestellten Betrachtungen erwiesen.

Fig. 103.



Dritter Fall. Die Gegenschaltung würde in zu günstigem Lichte erscheinen, wenn man nicht den Fall betrachtete, dass in einem Netze mit homologen Speisepunkten nur diese Punkte belastet sind. Die Verteilungsleitungen haben dann nur den Zweck als Ausgleichleitungen zu wirken, und der thatsächliche Spannungsverlust für die Abzweigströme ist $\epsilon_{vh} = 0$. Versetzt man dagegen jetzt die Speisepunkte des einen Netzes, so treten in diesem Spannungsverluste auf und die Leitungen müssen auch mit Rücksicht hierauf dimensioniert werden.

Vierter Fall. Die Stromentnahme sei zunächst wie im ersten Falle völlig gleichmässig verteilt, die Leitung sei aber auf

konstante Stromdichte berechnet. Der Querschnitt ändert sich also mit dem Strome nach dem Gesetze

$$\frac{i}{q} = j,$$

worin j eine Konstante ist. Der Spannungsverlust, der durch die Beziehung

$$\epsilon = \rho \int_0^l \frac{i}{q} dl$$

ausgedrückt ist, ist somit stets proportional der Länge, nämlich $\epsilon = j \cdot l \rho$

Es ist hierbei gleichgültig, ob die Belastung gleichmässig verteilt ist oder nicht; die in jedem einzelnen Leitungsstück vorhandene Proportionalität zwischen Spannungsverlust und Länge setzt sich eben über die Abzweigpunkte hinaus fort (vergl. S. 88), und die Kurven des Spannungsverlustes sind gerade Linien, wenn die Längen als Abscissen aufgetragen werden. Es folgt hieraus ohne Weiteres, dass

$$\epsilon_{vh} = 2 \epsilon_m,$$

dass dagegen

$$\epsilon_{eg} = \epsilon_m = \frac{1}{2} \epsilon_{vh}, \dots \dots \dots (114)$$

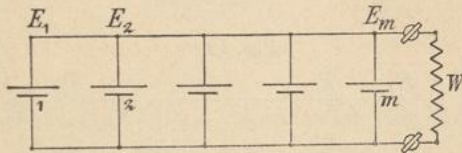
und ausserdem, dass die Nutzs Spannungen bei Gegenschaltung an allen Punkten der Leitung gleich gross sind.

128. Gegenschaltung bei Akkumulatorenbatterien. Der Umstand, dass im vierten Falle des vorigen Paragraphen Gleichheit der Spannungen an allen Punkten nicht nur für den theoretischen Fall gleichmässiger Belastung, sondern unter allen Umständen eintritt, gestattet direkt eine praktische Verwertung. In

Leitungsnetzen selbst spielt, wie schon früher erwähnt, die örtliche Gleichmässigkeit der Nutzs Spannungen keine grosse Rolle, wohl aber lässt sich das Ergebnis der obigen Rechnung bei der Aufstellung von Akkumulatorenbatterien mit parallel geschalteten Zellen, wie sie in Laboratorien und auch in elektrochemischen Anlagen zeitweise vorkommt, nützlich verwenden.

Für die Lebensdauer von Akkumulatorenbatterien ist es von Bedeutung, dass die einzelnen Zellen stets gleichmässig, d. h. alle mit gleicher Stromstärke entladen und geladen werden. Schaltet man nun die Batterie in der in Fig. 104 gezeichneten Weise, so

Fig. 104.



kann die Entladung unmöglich völlig gleichmässig sein, denn die ersten Zellen sind durch einen grösseren Widerstand geschlossen als die letzten, die dem Widerstande W nahe sind. Eine deutlichere Erklärung liefert folgende Ueberlegung: Alle Zellen haben dieselbe EMK E und denselben inneren Widerstand W_A , der Strom, der die einzelnen Zellen durchfliesst, lässt sich ausdrücken als

$$J_1 = \frac{E - E_1}{W_A}, \quad J_2 = \frac{E - E_2}{W_A} \text{ u. s. f., } \dots \dots (115)$$

wenn unter E_1, E_2 u. s. f. die Klemmenspannungen der einzelnen Zellen verstanden werden.

Zwischen den Anschlusspunkten zweier benachbarten Zellen, z. B. der ersten und zweiten, muss nun bei Anwendung der gewöhnlichen Schaltung notwendigerweise eine Spannungsdifferenz bestehen der Art, dass

$$\epsilon_1 = E_1 - E_2$$

$$\epsilon_2 = E_2 - E_3$$

u. s. f. einen positiven Wert haben, denn es fliesst Strom von der ersten in der Richtung zur zweiten Zelle. Es muss also sein

$$E_1 > E_2 > E_3 \dots \dots > E_m,$$

woraus in Verbindung mit Gleichung (115) folgt, dass

$$J_1 < J_2 < J_3 \dots \dots < J_m \dots \dots (116)$$

Soll umgekehrt die Entladung für alle Zellen dieselbe, also

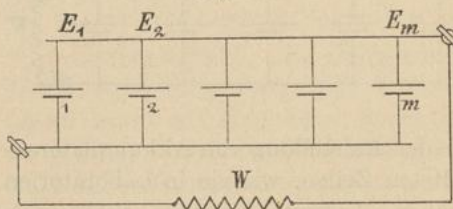
$$J_1 = J_2 = \dots \dots = J_m$$

sein, so muss sein

$$E_1 = E_2 \dots \dots = E_m.$$

Das ist aber nur dann der Fall, wenn die Gegenschaltung dem vierten der behandelten Fälle entsprechend gewählt wird, was

Fig. 105



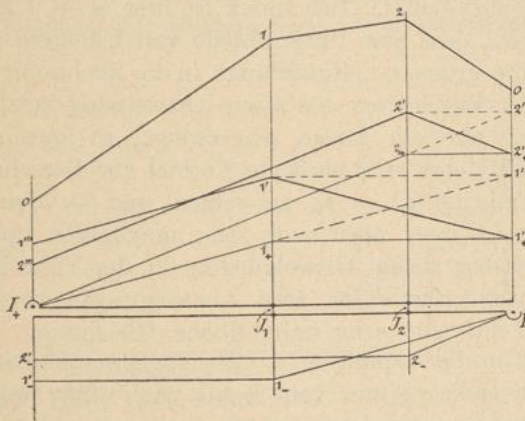
in Fig. 105 gezeichnet ist. Die Leitungen zwischen den einzelnen Zellen müssen also von den gegeneinander versetzten Hauptklemmen aus proportional der Stromstärke, und da diese der Zellenzahl proportional ist, proportional der Zahl der Zellen abnehmen.

Der Beweis für die Richtigkeit dieser Behauptung deckt sich mit der Betrachtung des vierten Falles, denn es ist ganz gleichgültig, ob an Stelle der dortigen positiven Stromentnahmen jetzt negative, also Stromzuführungen, gesetzt werden und umgekehrt.

129. Die Berechnung der Leitungen mit versetzten Speisepunkten.

Für die Berechnung der Leitungen in der neuen Anordnung genügen die alten Regeln nicht mehr, die richtigen kann man aber aus den vorigen Paragraphen ableiten. Man muss jetzt jede Leitung, die positive und die negative, für sich behandeln, und denke sich nun die Leitungen jedesmal an den Stellen aufgeschnitten, denen ein Speisepunkt gegenüber liegt. Will man dann auf konstante Stromdichte berechnen, so darf man schon für die Berechnung der positiven Leitung den ganzen zulässigen Spannungsverlust annehmen und auch die negative hiernach berechnen, denn dieser Wert wird, wie aus § 127 hervorgeht, an keinem Punkte der beiden kombinierten Leitungen überschritten werden. Vorausgesetzt ist hierbei natürlich, dass am Schnittpunkte der Leitung tatsächlich noch Strom, wenn auch ein sehr geringer, abgenommen wird, und dass nicht etwa, wenn diese Abzweigung fehlt, der zu-

Fig. 106.



lässige Spannungsverlust schon früher, an dem letzten Abzweigungspunkte, erreicht wird.

Schwieriger gestaltet sich die Berechnung auf konstanten Querschnitt, die in der Praxis fast allein in Betracht kommt. Die Schwierigkeit liegt darin, dass man den Ort des maximalen Spannungsverlustes nicht, wie es bisher immer bei offenen oder durch Aufschneiden geöffneten Leitungen der Fall war, vor der Rechnung kennt. Zur näheren Erläuterung der Verhältnisse diene Folgendes:

Von dem Leitungsstrang, bei dem Gegenschaltung angewendet werden soll, mögen zunächst nur zwei Ströme J_1 und J_2 abgezweigt sein, vergl. Fig. 106; die positive und negative Leitung sollen

denselben konstanten Querschnitt haben. Der Spannungsverlust für den Abweigstrom J_1 allein auf der positiven Leitung wird dann dargestellt durch die Kurve $I_+ 1_+ 1'_+$. In der negativen Leitung kommt hierzu der Spannungsverlust, der durch die Gerade $I_- 1_-$ dargestellt ist; diese Gerade ist aber gegen die Leitungslinie unter demselben Winkel geneigt wie die Gerade $I_+ 1_+$, denn die die beiden Leitungen durchfliessenden Ströme sind dieselben und die Neigung der Geraden ist $= \arctg \beta_1$. Addiert man nun die Spannungsverluste der negativen zu denen der positiven Leitung, so erkennt man, dass der im Punkte $1'$ erreichte Spannungsverlust (ϵ_1), unter dem der Strom J_1 abfliessen würde, wenn er allein eingeschaltet wäre, gerade so gross ist, als wenn J_1 am Ende der positiven Leitung abgezweigt wäre; es ist also

$$(\epsilon_1) = J_1 \frac{\varrho_{m+1}}{Q} \varrho, \dots \dots \dots (117)$$

worin ϱ_{m+1} die einfache Entfernung zwischen den beiden versetzten Speisepunkten bedeutet. Der Index ist hier $m + 1$ genannt, um hervorzuheben, dass zum Unterschiede von früherem jetzt im allgemeinen eine grössere Leitungslänge in die Rechnung einzuführen ist als sie der Entfernung der m ten Abzweigung entspricht.

Ist also nur ein Strom abgezweigt, so gewinnt man in Gleichung (117) eine sehr einfache Formel zur Berechnung, denn in diesem Falle ist $(\epsilon_1) = \epsilon_m$ zu setzen und Q kann berechnet werden. Sucht man aber nach dem maximalen Spannungsverluste bei beliebig vielen Abzweigungen (in der Figur ist die Kurve des Spannungsverlustes für zwei Abzweigungen konstruiert), so kommt man auf eine sehr unhandliche Gleichung. Nennt man nämlich den am Speisepunkte I_+ etwa abgezweigten Strom J_o und zählt in den Indices dann von rechts nach links weiter bis zur Abzweigung J_m an einer bestimmten Stelle oder bis J_{m+1} an dem Speisepunkte I_- , so ergiebt die Rechnung, die hier nicht durchgeführt werden soll, als Ausdruck für den Spannungsverlust ϵ_r , unter dem der Strom J_r abfliesst, die Gleichung

$$\epsilon_r = \left\{ \varrho_{m+1} \sum_o^m J_k + \varrho_r \left(\sum_v^{m+1} J_k - \sum_o^v J_k \right) + \sum_o^{r-1} J_k \varrho_k - \sum_{v+1}^m J_k \varrho_k \right\} \frac{\varrho}{Q} \dots \dots (118)$$

Mit Hilfe dieser Formel würde man den Ort des maximalen Spannungsverlustes ermitteln können, indem man die Verluste für verschiedene r berechnet und mit einander vergleicht.

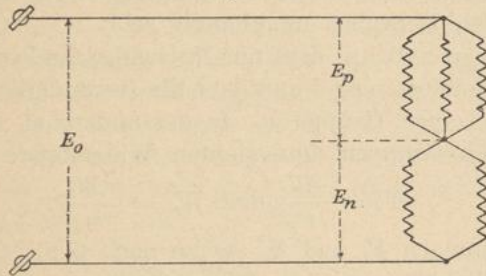
Ein solches Verfahren würde aber in den meisten Fällen viel zu umständlich sein und kann um so weniger empfohlen werden,

als die praktischen Verhältnisse ein Aufschneiden der Leitungen in der vorausgesetzten Weise i. A. nicht gestatten. Es bleibt unter diesen Umständen nichts weiter übrig, als Proberechnungen in folgender Weise anzustellen: Man bestimmt die Stromverteilung unter Annahme eines konstanten Querschnittes oder bekannter Querschnittsverhältnisse in den positiven und negativen Leitungen für sich zwischen je zwei Speisepunkten. Als Punkte des maximalen Spannungsverlustes können im allgemeinen nur wenige Punkte in Frage kommen, unter denen durch Proberechnungen zu entscheiden ist. Danach können die Querschnitte, die im positiven und negativen Netze verschieden sein können, bestimmt werden.

Die Mehrleitersysteme.

130. Die Entstehung der Mehrleitersysteme. Die Formel (25) auf Seite 67, nach der die Länge einer Leitung bei gleichem Effekt, gleichem Querschnitt und gleichem prozentualen Spannungsverlust mit dem Quadrate der Nutzspannung oder Betriebsspannung zu-

Fig. 107.



nehmen darf, hatte uns veranlasst, die Spannung so hoch zu wählen als es aus anderen Rücksichten noch zulässig war. Die Grenze war — vergl. § 42 — gezogen durch die Fabrikation der Glühlampen und durch die Spannung an den Klemmen der Bogenlampen. Es fragt sich, ob nicht selbst bei Berücksichtigung der hierdurch gestellten Bedingungen die Betriebsspannung noch weiter erhöht werden kann. Ein Mittel hierzu bietet die gemischte Schaltung der Nutzwiderstände, bei der Gruppen parallel geschalteter Stromempfänger hintereinander geschaltet sind, wie es in Fig. 107 für einfache Effekterübertragung und in Fig. 108 für räumliche Effekterverteilung abgebildet ist. Die mittlere Leitung in Fig. 108 soll Zwischenleitung, Mittelleitung oder Nullleitung genannt werden; die beiden anderen

Leitungen heißen im Gegensatze hierzu Aussenleitungen. Die Indices p , n und z sollen an die Worte positiv, negativ und zwischen erinnern.

Die Betriebsspannung würde durch diese Schaltungen auf das Doppelte, oder bei n hintereinandergeschalteten Gruppen auf das

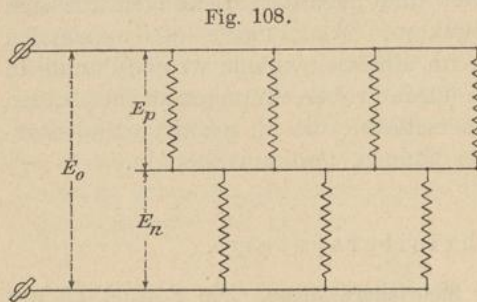


Fig. 108.

n -fache erhöht werden können. Bestimmt man aber nach dem in § 34 angegebenen Verfahren die Verteilung der Spannung und zwar unter der praktisch notwendigen Annahme, dass die Zahl der in den einzelnen Gruppen parallel geschalteten Nutzwiderstände

beliebig sich ändern darf, so wird man sofort einsehen, dass diese Schaltungen eine praktische Verwendung nicht gestatten, denn es ist die notwendige Bedingung nicht im Entferntesten erfüllt, dass das Funktionieren der einzelnen Stromempfänger von der angeschlossenen Zahl derselben unabhängig sei.

Nimmt man z. B. an, dass nur Nutzwiderstände von gleichem Werte W angeschlossen sind und dass die (veränderliche) Zahl derselben in der einen Gruppe m_p , in der andern m_n sei, so haben die den beiden Gruppen äquivalenten Widerstände die Beträge

$$W_p = \frac{W}{m_p} \text{ und } W_n = \frac{W}{m_n} \dots \dots \dots (119)$$

und die Spannungen E_p und E_n stehen nach § 21, Gleichung (3), im gleichen Verhältnis wie die Widerstände, an deren Klemmen sie gemessen sind; es ist also

$$E_p : E_n = m_n : m_p \dots \dots \dots (120)$$

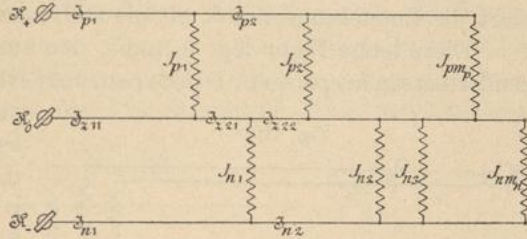
Für Glühlampenbeleuchtung war eine Spannungsänderung von 2% für zulässig erachtet worden; sollten demnach die skizzierten Anlagen für Glühlampen tauglich sein, so müsste die Bedingung erfüllt sein, dass sich auch m_p und m_n um nicht mehr als 2% von einander unterscheiden können; dass diese Bedingung aber immer erfüllt sei, kann praktisch nicht gefordert werden.

Teilt man aber die Betriebsspannung E_0 in so viel gleiche Teile als Gruppen von Nutzwiderständen gebildet sind und zieht von den Teilpunkten zu den Verbindungspunkten der Gruppen oder zu den Zwischenleitungen besondere Leitungen, so ist hierdurch die Möglichkeit gegeben, die Nutzsparnungen innerhalb der

durch die Bedingung vollkommener Elastizität gezogenen Grenzen zu halten. Durch dieses Verfahren ändert sich Fig. 108 in Fig. 109. Diese Figur stellt das sogenannte Dreileitersystem dar. Teilt man die

Betriebsspannung in vier Teile, so erhält man das Fünfleitersystem. Es liegt theoretisch kein Bedenken vor, die Zahl der Teile beliebig zu vergrößern, doch nur die beiden genannten

Fig. 109.



Systeme sind praktisch ausgeführt worden. Die Zwischenleitungen im Fünfleitersystem sind als positive und negative Zwischenleitung und Nullleitung zu unterscheiden.

131. Die Stromverteilung im Dreileitersystem. Die Stromverteilung in den Aussenleitungen ist genau dieselbe, als ob jeder Leitung für sich eine gleiche Rückleitung gegenüberstünde; es gelten die in § 52 aufgestellten Ausdrücke des Satzes von der Superposition der Ströme. Dieser Satz giebt aber auch Aufschluss über die Stromverteilung in der Mittelleitung, denn es ist seine allgemeine Gültigkeit sowohl für positive als negative Abzweigungen, also Stromzu- und -abführungen in allgemeinsten Form bewiesen (vergl. § 90). Als Stromzuführungen treten im vorliegenden Falle alle Ströme der *p*-Hälfte auf; diese sind also negativ einzuführen, und es ergibt sich — siehe Fig. 109 —:

$$\mathfrak{J}_{z11} = \sum_1^{m_n} J_{nu} - \sum_1^{m_p} J_{pu} \text{ u. s. f. (121)}$$

Diese Summen bedeuten aber für sich die Leitungsströme in den ersten Stücken der Aussenleitungen, es ist also

$$\mathfrak{J}_{z11} = \mathfrak{J}_{n1} - \mathfrak{J}_{p1} \text{ (122)}$$

In gleicher Weise ergibt sich

$$\mathfrak{J}_{z21} = \mathfrak{J}_{n1} - \mathfrak{J}_{p2}$$

u. s. f. für jedes beliebige Leitungsstück. Hierdurch ist bewiesen, dass die Zwischenleitung die Differenz der Ströme in den Aussenleitungen zu führen hat. Will man das Vorzeichen mit berücksichtigen und die Richtung von der Klemme fort als positiv bezeichnen, so lautet der Satz:

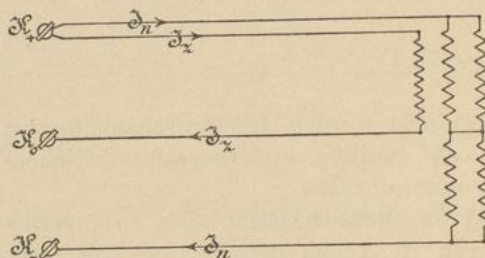
Der Strom in einem Stück der Zwischenleitung ist gleich dem negativen Werte der algebraischen

Summe der Ströme in den gegenüberstehenden Aussenleitungen.

Ein anschauliches Bild von der Wirkungsweise des Dreileiter-systemes liefern die beiden Figuren 110 und 111. Die erste der beiden Figuren zeigt \mathfrak{I}_p als aus $\mathfrak{I}_n + \mathfrak{I}_z$ entstanden, die zweite erklärt die Entstehung von \mathfrak{I}_z als die Differenz $\mathfrak{I}_p - \mathfrak{I}_n$.

Diese letzte Figur legt es nahe, den ausgesprochenen Satz folgendermassen auszulegen: Die Stromverteilung in der Mittelleitung

Fig. 110.

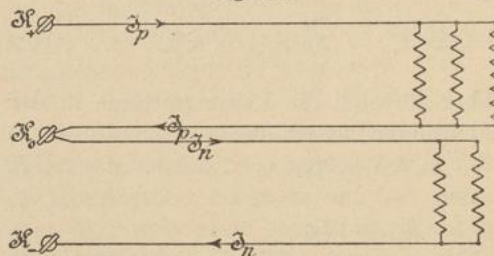


ung eines Dreileiter-systemes entsteht durch einfache Superposition aus den Strömen, die in einer besonderen Rückleitung der p -Hälfte und denen, die in einer besonderen Hinleitung der n -Hälfte fließen würden. Das-

selbe Ergebnis erhält man, wenn man sich die Mittelleitung nicht räumlich geteilt, sondern zeitlich nach einander zuerst als Rückleitung für die p -Hälfte, danach als Hinleitung für die n -Hälfte benützt denkt, und die dann fließenden Ströme algebraisch addiert, also superponiert.

132. Die Spannungsverteilung im Dreileitersystem. Die Kurve der Spannungsverluste muss für jede der drei Leitungen besonders

Fig. 111.



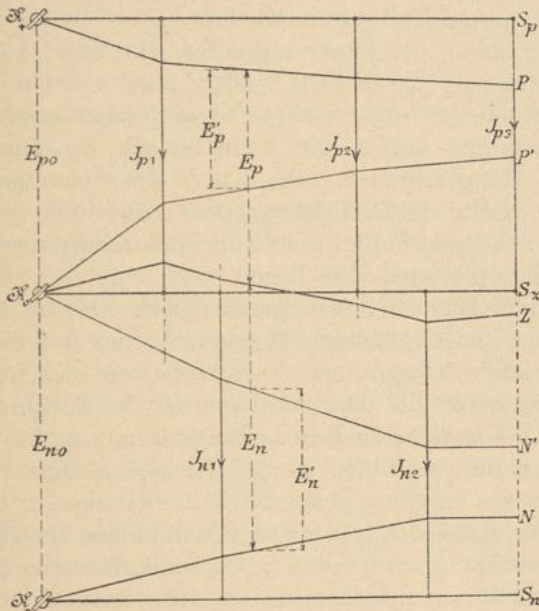
betrachtet werden. In den Aussenleitungen haben sich die Kurven gegenüber den Kurven eines einfachen Zweileitersystemes zweifellos gar nicht geändert, nur in der Mittelleitung liegen neue Verhältnisse vor; die die Span-

nungsverteilung beeinflussen. Wie sich diese Verhältnisse gestalten, lässt sich mit Hilfe des Satzes von der Superposition der Spannungsverluste sofort übersehen.

Aus diesem Satze, wie er in § 131 ausgesprochen ist, kann ohne weiteres gefolgert werden, dass sich die wahre Kurve des Spannungsverlustes in der Mittelleitung durch einfache Super-

position aus den Kurven ergibt, die man erhalten würde, wenn diese Leitung erst ausschliesslich für die eine, danach für die andere Hälfte des Dreileitersystemes benutzt würde. Die nähere Betrachtung soll auf die Voraussetzung beschränkt werden, dass die Aussenleitungen ihrer ganzen Länge nach und unter einander gleichen Querschnitt haben, und dass der Querschnitt der Mittelleitung ebenfalls konstant sei; dass er aber auch gleich dem der Aussenleitungen sei, wird nicht gefordert. Die Spannungsverteilung lässt sich dann in der in Fig. 112 skizzierten Form zur Anschau-

Fig. 112.



ung bringen; der Querschnitt der Mittelleitung ist hier gleich der Hälfte des Querschnittes der Aussenleitungen angenommen.

Wäre die negative Aussenleitung vollständig stromlos, die Mittelleitung also nur als Rückleitung für die positive Aussenleitung wirksam, so würden sich die Nutzschnnungen wie in Fig. 112 als Ordinatenabschnitte zwischen den Kurven K_+P und K_0P' darstellen; eine Spannung zwischen beliebigen Punkten der Leitungen ist in E'_p eingezeichnet. Diente dagegen die Mittelleitung ausschliesslich für die negative Hälfte des Systemes, so würden die Kurven K_-N und K_0N' , und dementsprechend die Spannung E'_n gelten. Die wahre für die Mittelleitung gültige Kurve ergibt

sich nun durch algebraische Addition der Ordinatenabschnitte von $K_o P'$ und $K_o N'$, welche immer entgegengesetztes Vorzeichen haben. So entsteht die Kurve $K_o Z$, und an den vorhin ins Auge gefassten Punkten treten thatsächlich die Spannungen E_p und E_n auf; diese Spannungen sind demnach für beide Hälften grösser, der wahre Spannungsverlust also kleiner geworden als vorher.

In Fig. 112 sollen folgende Punkte besonders beachtet werden: 1. Der Spannungsverlust, unter dem die Nutzwiderstände funktionieren wird durch Anwendung einer Mittelleitung an Stelle der vorher gedachten einzelnen Leitungen (vergl. Fig. 111) wesentlich verringert. 2. Die Spannungskurve $K_o Z$ kann ein oder mehreremal durch Null hindurchgehen. 3. Durch Wirkung der Mittelleitung kann der Spannungsverlust in einer Aussenleitung nicht nur teilweise ausgeglichen, sondern auch vollständig kompensiert und schliesslich sogar mehr als kompensiert werden, so dass eine Nutzspannung höher sein kann als die Spannung E_{po} oder E_{no} an den Hauptklemmen. Die Kurve des Spannungsverlustes, die für jede Hälfte des Dreileitersystemes gezeichnet werden kann, würde also in diesem Falle durch Null hindurchgegangen sein und unterhalb der Abscissenachse liegen.

133. Der Einfluss von Belastungsänderungen. Das Dreileitersystem wird, wie aus der einleitenden Betrachtung des § 126 hervorgeht nur bei grossen Anlagen, wie Leitungsnetzen für Städtebeleuchtungen, verwendet. Bei diesen Anlagen ist der einzelne Nutzstrom sehr klein im Vergleich zu dem Leitungsstrom, und es ist deshalb nicht schwer, die Anschlüsse so auf die beiden Hälften des Dreileitersystemes zu verteilen, dass die Mittelleitung im Falle der maximalen Belastung, d. h. der in die Pläne eingeschriebenen und der Berechnung zu Grunde zu legenden Belastung, nur einen sehr geringen Strom führt, und dass demgemäss der Spannungsverlust in jeder Hälfte nur oder fast nur durch den Verlust in der zugehörigen Aussenleitung gebildet wird.

Ändert sich aber die Belastung, so kann diese zwar so gleichmässig in beiden Hälften vor sich gehen, dass auch dann noch die Mittelleitung annähernd stromlos bleibt, sie kann aber auch so erfolgen, dass der Strom in dieser Leitung mehr und mehr zunimmt und schliesslich den überhaupt möglichen grössten Wert erreicht, nämlich dann, wenn die eine Hälfte voll, die andere gar nicht belastet ist. In diesem Grenzfall addiert sich in der voll belasteten, z. B. der positiven Hälfte zu dem Spannungsverluste in der Aussenleitung ϵ_p der in der Mittelleitung auftretende Verlust ϵ_s , der bei gleichem Querschnitte denselben, bei halbem Quer-

schnitte den doppelten Wert wie ϵ_p hat; vergl. Fig. 112, in der $P S_z = 2 P S_p$, also $\epsilon_s = 2 \epsilon_p$ ist. In der negativen, unbelasteten oder ganz schwach belasteten, Hälfte wird gleichzeitig die Spannung um den Betrag ϵ_s erhöht. Wirft sich nun die ganze Belastung von der p -Hälfte auf die n -Hälfte, so tritt umgekehrt in der ersteren eine Spannungserhöhung, in der letzteren eine Spannungserniedrigung von derselben Grösse wie in dem vorigen Falle auf.

Die Grenzen des Spannungsverlustes, unter dem ein Stromempfänger funktionieren kann, sind also

$$\begin{aligned} &\text{für } Q_s = Q_p = Q_n \\ &\quad \epsilon_{max} = 2 \epsilon_p ; \epsilon_{min} = - \epsilon_p ; \\ &\text{für } Q_s = \frac{1}{2} Q_p = \frac{1}{2} Q_n \\ &\quad \epsilon_{max} = 3 \epsilon_p ; \epsilon_{min} = - 2 \epsilon_p . \end{aligned}$$

Die Spannungsschwankungen erreichen demnach die Beträge

$$A E = \epsilon_{max} - \epsilon_{min} = 3 \epsilon_p \dots \dots \dots (123)$$

für den ersten, oder

$$A E = \epsilon_{max} - \epsilon_{min} = 5 \epsilon_p \dots \dots \dots (124)$$

für den zweiten Fall; sie sind also ihrem Betrag und ihrem Charakter nach wesentlich verschieden von den Schwankungen, die bei Belastungsänderungen im Zweileitersystem vorkommen können. Während bei diesem der Spannungsverlust ϵ_m , der der Berechnung zu Grunde gelegt war, niemals überschritten werden konnte, die Nutzsparnungen also nur zwischen den Werten E_o und $E_o - \epsilon_m$ schwanken konnten, sind beim Dreileitersystem Schwankungen in viel weiteren Grenzen denkbar, und die Nutzsparnungen können sogar grösser werden als die Betriebsspannung.

134. Grundlagen für die Berechnung der Leitungen im Dreileitersystem. Die Grundlagen für die Berechnung müssen, wenn die Leitungen vollkommen elastisch sein sollen, offenbar die möglichen Spannungsschwankungen bilden.

Von den verschiedenen Berechnungsarten soll nur die praktisch allein wichtige auf konstanten Querschnitt genauer betrachtet werden. Es werde ferner angenommen, dass die Belastung so gleichmässig auf beide Hälften des Systems verteilt ist, dass bei der maximal möglichen Belastung die Mittelleitung vollständig stromlos sei, während die Belastungsschwankungen in den einzelnen Hälften vorläufig in den weitesten Grenzen zugelassen werden sollen. In dem Falle der maximalen Belastung kann das System als ein Zweileitersystem angesehen werden, bei dem die Nutzwiderstände in zwei Gruppen hintereinander geschaltet sind. Die kleinen Differenzströme zwischen je zwei Anschlusspunkten

der Mittelleitung, die natürlich auftreten müssen, werden also vernachlässigt. Die beiden Aussenleitungen erhalten dann nach § 64 am besten denselben Querschnitt; der Querschnitt der Mittelleitung, über dessen Verhältnis zu dem der Aussenleitungen vorläufig noch völlig frei verfügt werden kann, soll ebenso gross oder halb so gross sein.

Könnte man den Spannungsverlust in der Mittelleitung ganz unberücksichtigt lassen, so würde die Rechnung genau der im Zweileitersystem entsprechen, und man hätte im Vergleich zu diesem erstens nur mit dem halben Strome, zweitens mit dem doppelten Spannungsverluste zu rechnen, hätte also den in § 46 behandelten Vorteil der Spannungsverdoppelung ganz erreicht; der dieser Berechnung zu Grunde zu legende Spannungsverlust heisse ϵ_m und werde, wo es nötig ist, als ϵ_{m3} von dem Verluste im Zweileitersystem, ϵ_{m2} , der gleichzeitig den Spannungsverlust für vollkommen elastische Leitungen bezeichnet, unterschieden. Zunächst ist festzustellen, dass

$$\epsilon_{m3} = 2 \epsilon_{m2}$$

sein darf.

Legt man aber der unter Vernachlässigung der Mittelleitung auszuführenden Berechnung diesen Spannungsverlust zu Grunde, so dass in einer Aussenleitung der Verlust $\frac{1}{2} \epsilon_{m3} (= \epsilon_p = \epsilon_n)$ auftritt, so ist die Spannungsschwankung nach Gleichung (123)

$$AE = \frac{3}{2} \epsilon_{m3} = 3 \epsilon_{m2}, \dots \dots \dots (125)$$

also dreimal so gross, als sie für Glühlampen sein dürfte. Es folgt hieraus, dass der Berechnung an Stelle von ϵ_{m3} nur der dritte Teil dieses Verlustes

$$\frac{\epsilon_{m3}}{3} = \frac{2}{3} \epsilon_{m2}$$

zu Grunde gelegt werden darf. Verglichen mit dem Zweileitersystem werden die Aussenleitungen jetzt $\frac{3}{4}$ mal so stark, da der Spannungsverlust $\frac{2}{3}$, die Stromstärke die Hälfte beträgt. Die Mittelleitung hat denselben Querschnitt, die Summe der Querschnitte aller drei Leitungen hat also den relativen Wert

$$3 Q_3 = \frac{9}{4} \quad \text{gegenüber} \quad 2 Q_2 = 2 \dots \dots \dots (126)$$

bei dem Zweileitersystem. Der erhoffte Vorteil der Spannungserhöhung würde also hierbei in das Gegenteil umgeschlagen sein.

Noch ungünstiger liegen die Verhältnisse, wenn man die Mittelleitung halb so stark annimmt wie die Aussenleitungen. Es

darf, unter der Voraussetzung vollkommener Elastizität, dann nur der Verlust $\frac{1}{5} \epsilon_{m3}$ der Berechnung zu Grunde gelegt werden, und es ergibt sich die Querschnittsumme zu

$$2 Q_3 + \frac{Q_3}{2} = \frac{12,5}{4} \quad \text{gegen} \quad 2 Q_2 = 2 \dots \dots (127)$$

Das Eintreten der äussersten Grenzfälle der Belastung ist nun unter allen Umständen unwahrscheinlich, wenn nicht unmöglich, und die Strom- und Spannungsschwankungen werden um so weiter von diesen Grenzen entfernt bleiben, je sorgfältiger die Verteilung der Nutzwiderstände auf die beiden Hälften des Dreileitersystems vorgenommen ist. Die Betrachtungen lehren, dass das Dreileitersystem nur dann vorteilhaft ist, wenn die Belastung sorgfältig auf die beiden Hälften des Systemes verteilt ist, und dass diese Sorgfalt sich nicht nur auf eine gleichmässige Teilung der überhaupt angeschlossenen Stromempfänger erstrecken muss, sondern ganz besonders auch darauf, dass die Stromempfänger in den beiden Hälften gleichen Charakter haben, denn nur dann kann es erreicht werden, dass auch bei beliebiger, etwa halber Belastung die Mittelleitung annähernd stromlos ist. Es würde z. B. ganz verkehrt sein, eine Hausinstallation in der Weise an ein Dreileiternetz anzuschliessen, dass die Lampen in den Wohnräumen, Fluren u. dergl. an die eine, in den Festräumen an die andere Hälfte des Systemes gelegt würden, denn bei dem verschiedenen Charakter der Räume muss es wahrscheinlich sein, dass zu einer bestimmten Zeit die Stromentnahme in der einen Hälfte die in der anderen weit überwiegt, auch wenn bei dem grössten möglichen Stromverbrauch beide Seiten völlig gleich belastet wären.

Ist dies vermieden, so ist der Einfluss der Mittelleitung auf den Spannungsverlust, wie durch die Praxis bewiesen ist, sehr gering, und der mit der Spannungserhöhung angestrebte Vorteil wird, wenn auch infolge der Notwendigkeit einer Mittelleitung nicht im vollen Umfange, erreicht. Da aber diese Voraussetzung erfüllt sein muss, so können die Mehrleitersysteme nicht mehr als vollkommen elastisch angesehen werden, sondern verdienen nur den Namen *bedingt elastischer Leitungen*.

Da nun die Mittelleitung nur dann zur Wirkung kommt, wenn die Belastung in den beiden Hälften des Systemes ungleich ist, also unter Verhältnissen, über die — da die oben betrachteten Grenzfälle als ausgeschlossen anzusehen sind — bestimmte Aussagen gar nicht gemacht werden können, die vielmehr durch rein praktische Umstände bestimmt sind, so fehlt auch eine ge-

naue Unterlage für die Berechnung der Mittelleitung, nämlich die Stromverteilung. Eine exakte Berechnung der Leitungen ist deshalb überhaupt nicht möglich, und es bleibt nur übrig, ein bestimmtes Verhältnis zwischen dem Querschnitt der Mittelleitung Q_z und dem der Aussenleitungen Q_p und Q_n anzunehmen.

135. Wahl des Verhältnisses der Querschnitte im Dreileitersystem.

Die endgültige Beantwortung der Frage nach diesem Verhältnis muss also auf empirischem Wege aus der Praxis gefunden werden, da nur diese über die Grösse der Stromschwankungen Aufschluss geben kann. Eine theoretische Ueberlegung aber kann uns zu Hilfe kommen, die nämlich, die schon früher angedeutet wurde und jetzt in dem Satze präzisiert werden soll: Ist die Schalteinheit dieselbe und die Verteilung auf beide Hälften des Systemes gleich sorgfältig durchgeführt, so kann der Querschnitt der Mittelleitung im Vergleich zu dem der Aussenleitungen da dünner angenommen werden, wo die Stromstärke in den Aussenleitungen grösser ist. Die Richtigkeit dieses Satzes erhellt daraus, dass eine gleichmässige Belastungsschwankung in beiden Seiten des Systemes um so wahrscheinlicher ist, je grösser der Gesamtstrom im Vergleich zur Schalteinheit ist.

Die Praxis hat diesen Satz bestätigt, und sie berücksichtigt ihn dadurch, dass das Verhältnis $Q_z : Q_p$ in den Speiseleitungen eines Netzes kleiner genommen wird als in den Verteilungsleitungen; man setzt nämlich gewöhnlich

$$Q_z = \frac{1}{2} Q_p = \frac{1}{2} Q_n$$

für die Verteilungsleitungen, dagegen

$$Q_z = \frac{1}{2} Q_p, \frac{1}{3} Q_p \text{ bis } \frac{1}{4} Q_p$$

für die Speiseleitungen. In Netzen mit vielen Speisepunkten lässt man auch einige Speiseleitungen ganz ohne Mittelleitung, was aber nicht zu empfehlen ist. Zweckmässig würde es sein, auch in dem Verteilungsnetze einen Unterschied zwischen stark und schwach belasteten Leitungen zu machen und die Mittelleitung der letzteren relativ schwächer zu nehmen als die der ersteren, was neuerdings auch geschieht. Offenbar setzen aber, was nochmals betont werden soll, diese Querschnittsverhältnisse eine sehr sorgfältige Verteilung der Belastung auf beide Hälften des Systemes voraus, wenn man sich nicht mit einem sehr geringen Spannungsverluste in den Aussenleitungen begnügen soll.

136. Die Berechnung der Leitungen. Unter der Voraussetzung dieser genauen Verteilung wählt man den Spannungsverlust, der

der Berechnung zu Grunde gelegt wird, prozentual zur Nutzspannung fast so hoch wie im Zweileitersystem. Lässt man in diesem letzteren 2% zu, so nimmt man für das Dreileitersystem gewöhnlich 1,5% und nimmt an, dass durch diese Verminderung beide Systeme auf gleiche Elastizität gebracht wären. In den Speiseleitungen vermindert man den Verlust etwa von 10% auf 7,5%. Die Rechnung vollzieht sich im Uebrigen genau so wie beim Zweileitersystem, nämlich so, als ob die Mittelleitung nicht vorhanden und jede einzelne Belastung in zwei vollständig gleichen Gruppen hintereinander geschaltet wäre. Die Stromstärke ist dann auf die Hälfte gesunken, der Spannungsverlust im Verhältnis 3:2 gestiegen, der Querschnitt der Aussenleitungen ist demnach den dritten Teil so stark wie beim Zweileitersystem.

137. Die zulässige Belastung der Mittelleitung bei vollkommener Elastizität. Liegt eine nach dem Dreileitersystem ausgeführte Leitung vor, die nur am äussersten Ende belastet ist, so ist durch die Annahme von $\epsilon_{m3} = 1,5\%$ gegenüber dem für vollkommen elastische Leitungen zulässigen $\epsilon_{m2} = 2\%$ und durch Festsetzung der Querschnittsverhältnisse die Belastungsdifferenz in den beiden Hälften des Systemes, also die Belastung der Mittelleitung bestimmt, die eintreten darf, wenn die Spannungsschwankung den zulässigen Betrag nicht überschreiten soll.

Das Verhältnis der absoluten Beträge der beiden Spannungsverluste ist $\epsilon_{m3} : \epsilon_{m2} = 3 : 2$ oder unter Einführung des Verlustes $\epsilon_{mp} = \epsilon_{mn} = \frac{1}{2} \epsilon_{m3}$ in einer Aussenleitung allein

$$\epsilon_{m2} = \frac{4}{3} \epsilon_{mp} = A E, \dots \dots \dots (128)$$

womit die zulässige Spannungsschwankung ausgedrückt ist. Das Verhältnis der Querschnitte sei gegeben durch die Grösse k aus

$$Q_p = k \cdot Q_z$$

Im Falle der maximalen Belastung sei die Mittelleitung, wie früher, stromlos, also $J_{mp} = J_{mn}$. Die gesuchte Belastung der Mittelleitung J_z bei Belastungsschwankungen kann ausgedrückt werden als ein Bruchteil von J_{mp} , nämlich

$$J_z = \gamma J_{mp},$$

dann ist γ die gesuchte Grösse.

Die gesamte Spannungsschwankung setzt sich nun nach § 133 zusammen aus einer Spannungserniedrigung und einer Spannungserhöhung. Die erstere hat den Betrag

$$\frac{J_{mp}^2}{Q_p} q + \frac{\gamma J_{mp}^2}{\frac{Q_p}{k}} q,$$

wenn ϱ die einfache Länge der Leitung ist, und sie wird erreicht, wenn die p -Hälfte des Systemes voll mit J_{mp} belastet ist, während die Belastung der n -Hälfte um den Betrag γJ_{mp} abgenommen hat. Eine Spannungserhöhung tritt ein, wenn nur die n -Hälfte, und zwar mit dem Strome γJ_{mp} belastet ist; sie beträgt

$$\frac{\gamma J_{mp} \varrho}{\frac{Q_p}{k}} e;$$

also insgesamt ist

$$AE = (1 + 2 \gamma k) \frac{J_{mp} \varrho}{Q_p} e \dots \dots \dots (129)$$

Hierin ist aber

$$\frac{J_{mp} \varrho}{Q_p} e = \epsilon_{mp};$$

durch Verbindung von Gleichung (128) mit Gleichung (129) ergibt sich also unter Benutzung der zuletzt genannten Beziehung

$$\gamma = \frac{1}{6k} \dots \dots \dots (130)$$

Ist $Q_p = 2 Q_z$, so ist $\gamma = 1/12$, die Mittelleitung darf also dann bei beliebiger Belastung einer Aussenleitung mit 8,33% des maximalen Aussenstromes belastet sein, ohne dass die zulässige Grenze der Elastizität überschritten würde.

Die Verteilung der Belastung auf die beiden Hälften des Systemes ist also so vorzunehmen, dass im Falle der maximalen Belastung die Belastungsdifferenz 8,33% nicht überschreitet, wenn $Q_p = 2 Q_z$ ist. Ist bei der Verteilung mit der im § 134 geforderten Sorgfalt unter Berücksichtigung des Charakters der einzelnen Anschlussstellen verfahren, so ist die Wahrscheinlichkeit, dass J_z den angegebenen Wert von 8,33% des maximalen Aussenstromes überschreitet, sehr gering, denn je kleiner der Strom in den Aussenleitungen wird, um so grösser wird der Wert von J_z relativ zu den Aussenströmen. Nimmt also die Gesamtbelastung ab, so darf die Differenz in der Belastung der beiden Hälften zunehmen. Nach Erfahrungen der Praxis kann man annehmen, dass das Dreileitersystem unter den angegebenen Verhältnissen im allgemeinen tatsächlich dieselbe Elastizität besitzt wie das Zweileitersystem.

138. Das Fünfleitersystem. Wie man sich das Dreileitersystem aus dem Zweileitersystem dadurch entstanden denken kann, dass man zwei von einander unabhängige Leitungsstränge des letzteren in der Weise mit einander verbindet, dass die positive Leitung des einen mit der negativen des andern vereinigt wird, so kann man von zwei nach dem Dreileitersystem ausgeführten Leitungssträngen

die positive Aussenleitung des einen mit der negativen des anderen zusammenlegen und erhält dann das Fünfleitersystem.

Ueber die Stromverteilung und die Spannungsverteilung gelten genau dieselben Betrachtungen, wie sie in den vorigen Paragraphen für das Dreileitersystem angestellt wurden, doch bedürfen sie noch einer Erweiterung, da jetzt Nutzwiderstände vorkommen, die nur an Zwischenleitungen, nicht auch an eine Aussenleitung, angeschlossen sind, und an den Klemmen dieser Widerstände können die Spannungsschwankungen wesentlich höher werden als an den andern.

Die Verhältnisse lassen sich leicht erläutern, wenn man gleiche Querschnitte in allen fünf Leitungen und nur eine Stromentnahme

Fig. 113.

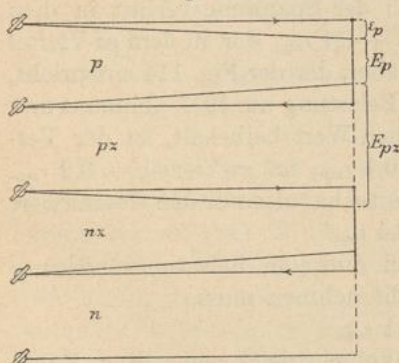
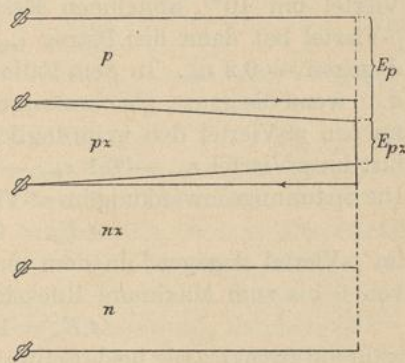


Fig. 114.



am Endpunkte der Leitung annimmt, die zunächst auf alle vier Viertel des Systemes gleichmässig verteilt ist. Lässt man die Belastung jetzt so schwanken, dass ein oder zwei oder drei bestimmte Viertel voll, die andern dagegen gar nicht belastet sind, und lässt man bei diesem Wechsel alle möglichen Kombinationen zu, so tritt der ungünstigste Fall dann ein, wenn einmal das p -Viertel und das nz -Viertel voll, das pz -Viertel dagegen gar nicht belastet ist (vergl. Fig. 113), und wenn das andere Mal das Umgekehrte der Fall ist (vergl. Fig. 114). Die beiden Figuren geben die Spannungsverteilung nach der in Fig. 112 angewendeten Darstellungsweise an und lassen erkennen, dass im Falle gleicher Querschnitte für alle Leitungen die Nutzschnung E_{pz} (und wegen der Symmetrie des Systemes auch E_{nz}) um $4 \epsilon_p$ schwanken kann, dass also

$$\Delta E_{pz} = \Delta E_{nz} = 4 \epsilon_p,$$

während

$$\Delta E_p = \Delta E_n = 3 \epsilon_p$$

wie beim Dreileitersystem bleibt.

Teichmüller, elektrische Leitungen.

Da wir solche extremen Fälle einseitiger Belastung für praktisch ausgeschlossen halten müssen, so muss man die Betrachtung und die Figuren so umdeuten, dass unter den eingezeichneten Kurven nicht die Kurven des wahren, sondern eines Spannungsverlustes zu denken sind, der zu dem Verluste einer auf alle Viertel gleichmässig verteilten Belastung zu superponieren ist; der Spannungsverlust dieser gleichmässigen Belastung tritt also nur in den beiden Aussenleitungen auf.

Nimmt man an, dass die Verschiedenheit in der Belastung der einzelnen Viertel 10% der maximalen betrage und dass der Verlust in den beiden Aussenleitungen bei völlig gleichmässiger, maximaler Belastung gleich $\epsilon_{mp} = \epsilon_{mn}$ sei, so erhält man den der Fig. 113 entsprechenden Fall, wenn man die Belastung in dem pz -Viertel um 10% abnehmen lässt; der Spannungsverlust in dem p -Viertel hat dann den Betrag $\epsilon_{mp} + 0,1 \epsilon_{mp}$, der in dem pz -Viertel dagegen $-0,2 \epsilon_{mp}$. In dem Falle aber, der der Fig. 114 entspricht, d. h. wenn die ganze, gleichmässige Belastung um 10% abnimmt und nur im pz -Viertel den ursprünglichen Wert beibehält, ist der Verlust im p -Viertel $\epsilon_{mp} - 0,1 \epsilon_{mp} - 0,1 \epsilon_{mp}$, im pz -Viertel $+0,2 \epsilon_{mp}$. Die Spannungsschwankung im pz -Viertel hat also nur den Gesamtwert

$$\Delta E_{pz} = 0,4 \epsilon_{mp}$$

im p -Viertel dagegen, in dem man auf eine Belastungsänderung von 0 bis zum Maximum Rücksicht nehmen muss,

$$\Delta E_p = 1,1 \epsilon_{mp},$$

während zweckmässig beide Schwankungen gleich sein sollten. Führt man dieselbe Betrachtung für $Q_{pz} = Q_z = Q_{nz} = 0,5 Q_p = 0,5 Q_n$ durch, so erhält man

$$\Delta E_{pz} = 0,8 \epsilon_{mp}$$

und

$$\Delta E_p = 1,2 \epsilon_{mp},$$

und schliesslich wird für $Q_{pz} = Q_{nz} = 0,5 Q_p$ und $Q_z = 0,25 Q_p$

$$\Delta E_{pz} = 1,2 \epsilon_{mp}$$

und

$$\Delta E_p = 1,2 \epsilon_{mp}$$

} (131)

Es geht hieraus hervor, dass unter der Annahme einer Belastungsverschiedenheit von 10% unter sonst maximaler Belastung die Mittelleitung zweckmässig den vierten Teil, die anderen Zwischenleitungen zweckmässig die Hälfte des Querschnittes der Aussenleitungen erhalten.

Nimmt man dagegen, wie oben in § 136 an, dass der Spannungsverlust zu 1,5% in den Verteilungs- und zu 7,5% in den Speiseleitungen gesetzt wäre, sodass wiederum

$$\varepsilon_{m2} = \frac{4}{3} \varepsilon_{mp},$$

und fragt nach der zulässigen Belastungsverschiedenheit, so bleibt diese für das p - und das n -Viertel offenbar dieselbe wie beim Dreileitersystem, nämlich

$$\gamma_1 = \frac{1}{6 k_1}, \dots \dots \dots (132)$$

für die beiden andern Viertel aber ergibt sich folgendes: Es ist

$$\Delta E_{pz} = \Delta E_{nz} = \frac{2\gamma_2 J_{mp} \varrho}{\frac{Q_p}{k_1}} + \frac{2\gamma_2 J_{mp} \varrho}{\frac{Q_p}{k_2}} \varrho,$$

wenn $Q_p = k_1 Q_{pz}$ und $Q_p = k_2 Q_z$ gesetzt ist. In ähnlicher Weise wie oben folgt hieraus

$$\gamma_2 = \frac{2}{3(k_1 + k_2)} \dots \dots \dots (133)$$

Hierin kann k_2 so gewählt werden, dass $\gamma_1 = \gamma_2$ ist; dann ist nämlich

$$k_2 = 3 k_1. \dots \dots \dots (134)$$

Wenn also die Zwischenleitungen halb so stark gewählt sind wie die Aussenleitungen, so würde es zweckmässig sein, die Mittelleitung den sechsten Teil so stark anzunehmen, da dann alle Viertel gleiche Elastizität besitzen. Die Elastizität ist dann dieselbe wie beim Dreileitersystem, d. h. es können dieselben Belastungsdifferenzen im Vergleich zum maximalen Aussenstrom, nämlich 8,33% auftreten. Hierbei ist aber zu berücksichtigen, dass der Strom in den Aussenleitungen beim Fünfleitersystem im allgemeinen kleiner sein wird, als beim Dreileitersystem, denn die gesamte Stromentnahme wird bei diesem Systeme nur halbiert, bei jenem aber gevierteilt. Infolgedessen sind nach dem in § 135 ausgesprochenen Satze im Fünfleitersysteme grössere Belastungsschwankungen, also auch Belastungsdifferenzen in den Vierteln zu erwarten als beim Dreileitersystem. Man pflegt deshalb das oben angegebene Verhältnis

$$(Q_p = Q_n) : (Q_{pz} = Q_{nz}) : Q_z = 4 : 2 : 1$$

beizubehalten. Bei stark belasteten Speiseleitungen kann, wie oben beim Dreileitersystem, das Verhältnis noch zu Ungunsten der Zwischen- und Mittelleitungen verändert werden.

Die Berechnung bleibt nach Festsetzung des Spannungsverlustes wieder prinzipiell dieselbe wie beim Zwei- und Dreileitersystem.

Die Vergleiche der drei Systeme mit einander, die in den obigen Betrachtungen angestellt wurden, bedürfen noch der Ergänzung. Das Drei- und das Fünfleitersystem waren eingeführt,

damit das Verteilungsgebiet durch die hiermit verbundene Spannungserhöhung erweitert werden könne. Es sollen jetzt Vergleiche angestellt werden, aus denen hervorgeht, wie weit das angestrebte Ziel erreicht ist.

139. Vergleichung der Systeme in Bezug auf den Aufwand von Leitungsmetall. In § 46 ist in Formel (28a) die Abhängigkeit der Leitungslänge von dem Kupferaufwand und der Spannung bei gleichem zu übertragendem Effekt und prozentual gleichem Spannungsverlust angegeben. Setzt man in dieser Formel statt der Leitungslänge die einfache Entfernung ein, die aber (was wohl zu beachten ist) mit demselben Buchstaben L oder l bezeichnet werden soll, so wird daraus für das Zweileitersystem

$$2l = \frac{1}{10} \sqrt{\frac{pM}{\mathfrak{E} \varrho}} \cdot e,$$

wobei wieder die Grössen, die ausdrücklich als Veränderliche bezeichnet werden sollen, durch kleine Buchstaben kenntlich gemacht sind. Für konstante Länge und veränderliche Kupfermenge ist für das Zweileitersystem

$$m_2 = C \cdot \frac{L^2}{e^2}, \dots \dots \dots (135)$$

worin

$$C = \frac{4 \cdot 100 \cdot \mathfrak{E} \varrho}{p}.$$

Diese Gleichung gilt also für den Fall, dass zwei Leitungen vorhanden sind. Für das Drei- oder das Fünfleitersystem drückt die Gleichung (135) nur den Kupferaufwand in den beiden Aussenleitungen aus; es kommen also noch Kupfermengen hinzu, deren Betrag von der Stärke der andern Leitungen abhängt. Die Rechnung soll durchgeführt werden erstens für den Fall, dass im Dreileiter- und im Fünfleitersystem alle drei oder alle fünf Leitungen untereinander gleich sind, und zweitens für den Fall ungleicher Querschnitte, das heisst, dass beim Dreileitersystem das Verhältnis

$$Q_2 : (Q_p = Q_n) = 1 : 2$$

beim Fünfleitersystem das Verhältnis

$$Q_2 : (Q_{ps} = Q_{ns}) : (Q_p = Q_n) = 1 : 2 : 4$$

bestehe. Es soll ferner die Berechnung auf prozentual gleichen Spannungsverlust und die Berechnung auf gleiche Elastizität unterschieden werden.

1. Vergleichung auf der Grundlage procentual gleichen Spannungsverlustes. Sind die Querschnitte gleich, so wird

$$m_3 = 1,5 C \frac{L^2}{e^2} \quad \text{und} \quad m_5 = 2,5 C \frac{L^2}{e^2},$$

sind dagegen die Querschnitte in den oben angegebenen Verhältnissen ungleich, so erhöhen die Zwischenleitungen den Kupferaufwand weniger, nämlich nur auf die Beträge

$$m_3 = 1,25 C \frac{L^2}{e^2} \quad \text{und} \quad m_5 = 1,625 C \frac{L^2}{e^2};$$

alle Zahlen folgen unmittelbar aus den Verhältnissen der Querschnitte.

Jetzt soll die Spannung den Systemen entsprechend variiert, nämlich für das Dreileitersystem verdoppelt, für das Fünfleitersystem vervierfacht werden, dann ergibt sich

$$M_2 = C \frac{L^2}{E_2^2}$$

und

$$M_3 = \frac{1,5}{4} C \frac{L^2}{E_2^2} \quad \text{oder} \quad \frac{1,25}{4} C \frac{L^2}{E_2^2} \quad \dots (136)$$

und

$$M_5 = \frac{2,5}{16} C \frac{L^2}{E_2^2} \quad \text{oder} \quad \frac{1,625}{16} C \frac{L^2}{E_2^2}.$$

Hieraus folgen als die Verhältnisse μ der Kupfermengen zu einander

$$\begin{aligned} \mu_{32} = M_3 : M_2 = 3 : 8 \quad \text{oder} \quad = 5 : 16 \\ \text{und} \\ \mu_{52} = M_5 : M_2 = 5 : 32 \quad \text{oder} \quad = 13 : 128 \end{aligned} \quad \dots (137)$$

2. Vergleichung auf der Grundlage gleicher Elastizität. Unter Gleichheit der Elastizität soll hier die bedingte Gleichheit verstanden werden, die (vergl. § 134) erreicht wird, wenn man für das Drei- und das Fünfleitersystem drei Viertel des für das Zweileitersystem zugelassenen procentualen Spannungsverlustes annimmt, und zwar soll, um die Rechnung nicht weiter zu komplizieren, derselbe Spannungsverlust sowohl bei gleichen als bei ungleichen Querschnitten angenommen werden, obwohl im ersteren Falle dieselbe Elastizität schon mit einem etwas höheren Spannungsverluste erreicht würde. Die Kupfermengen der beiden Mehrleitersysteme wachsen dann im Verhältnis 4 : 3, und man erhält

$$\begin{aligned} \mu'_{32} = 1 : 2 \quad \text{oder} \quad = 5 : 12 \\ \text{und} \\ \mu'_{52} = 5 : 24 \quad \text{oder} \quad = 13 : 96. \end{aligned} \quad \dots (138)$$

Die hierdurch ermittelten Verhältnisse, welche den relativen Kupferaufwand der drei Systeme darstellen, sind übersichtlicher in der folgenden Tabelle gegenübergestellt, in der das Kupfergewicht für das Zweileitersystem gleich 1000 angenommen ist.

Vergleichung der drei Leitungssysteme mit Rücksicht
auf den Aufwand von Leitungsmetall.

	procentual gleicher Spannungsverlust		gleiche Elastizität	
	gleiche Querschnitte	verschiedene Querschnitte	gleiche Querschnitte	verschiedene Querschnitte
Zweileiter	1000	1000	1000	1000
Dreileiter	375	312,5	500	417
Fünfleiter	156	101,5	208	135

140. Vergleichung der bei gleichem Kupferaufwande erreichten Entfernungen. Die Beziehungen zwischen Kupferaufwand und Entfernung sind in den Formeln (136) ausgedrückt. Setzt man in diesen alle M einander gleich, so kann das unter der Annahme gleicher Nutzspannung E_2 nur geschehen, wenn die Entfernungen L sich ändern, nämlich in folgenden Verhältnissen stehen

$$\left. \begin{aligned} \lambda_{32} = L_3 : L_2 &= \sqrt{\frac{8}{3}} \quad \text{oder} \quad = \sqrt{\frac{16}{5}} \\ \text{und} \\ \lambda_{52} = L_5 : L_2 &= \sqrt{\frac{32}{5}} \quad \text{oder} \quad = \sqrt{\frac{128}{13}} \end{aligned} \right\} \dots \dots (139)$$

Sind aber die Leitungen auf (bedingt) gleiche Elastizität berechnet, so waren die Kupfermengen M für die beiden Mehrleiter-systeme jedesmal im Verhältnis 3 : 2 grösser, und es ergeben sich dann die Beziehungen

$$\left. \begin{aligned} \lambda'_{32} = \sqrt{\frac{2}{1}} \quad \text{oder} \quad = \sqrt{\frac{12}{5}} \\ \text{und} \\ \lambda'_{52} = \sqrt{\frac{24}{5}} \quad \text{oder} \quad = \sqrt{\frac{96}{13}} \end{aligned} \right\} \dots \dots (140)$$

Die Verhältnisse kommen in der Tabelle auf der folgenden Seite deutlicher zum Ausdruck.

Die hiermit ermittelten Verhältnisse sind durch die Kurven in Fig. 115 ausgedrückt, welche die Abhängigkeit des Kupferaufwandes von der Leitungslänge oder umgekehrt bei den verschiedenen Systemen und unter den verschiedenen Bedingungen angeben. Die Kurven sind berechnet für einen Effekt $\mathcal{C} = 1000$ Watt und einen Spannungsverlust von 2% bei 110 Volt Nutzspannung. Die in der Figur angewendeten Zeichen bedeuten

II = Zweileitersystem, III = Dreileitersystem, V = Fünfleitersystem.

a = gleiche Elastizität, gleiche Querschnitte

b = „ „ „ ungleiche „

c = proc. gleicher Spannungsverlust, gleiche Querschnitte,

d = „ „ „ ungleiche „

Vergleichung der drei Leitungssysteme in Bezug auf die mit dem gleichen Kupferaufwande erreichten Entfernungen.

	procentual gleicher Spannungsverlust		gleiche Elastizität	
	gleiche Querschnitte	verschiedene Querschnitte	gleiche Querschnitte	verschiedene Querschnitte
Zweileiter	1000	1000	1000	1000
Dreileiter	1633	1790	1414	1549
Fünfleiter	2530	3137	2191	2718

141. Vergleichung mit Rücksicht auf die Kosten. Die Kupfermengen sind natürlich noch keineswegs massgebend für die Kosten der Leitungen bei Anwendung der verschiedenen Systeme, und die Frage nach diesen ist wichtiger als die Frage nach den Kupfermengen. Die Kosten einer Leitung lassen sich nach § 18 ausdrücken durch die Gleichung $k = (a + bq) l$ oder, wenn man das ganze Leitungssystem mit Hin- und Rückleitung und den etwaigen Zwischenleitungen ins Auge fasst, durch

$$k_n = (n a_n + n' b_n q) l, \dots \dots \dots (141)$$

worin l die einfache Entfernung, n die Zahl der Leitungen, also 2, 3 oder 5, ist, während n' das Verhältnis des Querschnitts der Zwischenleitungen zu dem der Aussenleitungen schon berücksichtigt, indem es die Grösse der Querschnittssumme aller nebeneinander liegenden Leitungen bedeutet, wenn der Querschnitt einer Aussenleitung gleich Eins gesetzt ist. Für gleiche Querschnitte ist also allemal $n' = n$, für ungleiche dagegen $n' = 2,5$ für das Dreileiter-, und $n' = 3,25$ für das Fünfleitersystem, wenn die Ungleichheit nach den in § 139 angegebenen Verhältnissen gewählt wird. Es ist dann immer

$$n' q l = m_n,$$

also gleich dem in dem besonderen Falle erforderlichen Kupferaufwande. Durch Einführung dieses Wertes kann man die oben abgeleiteten Ergebnisse benutzen und hierdurch die Rechnung verein-

Fig. 115. Kupfermenge der Leitungen in Abhängigkeit von der Entfernung.
 $\mathcal{E} = 1000$ Watt.

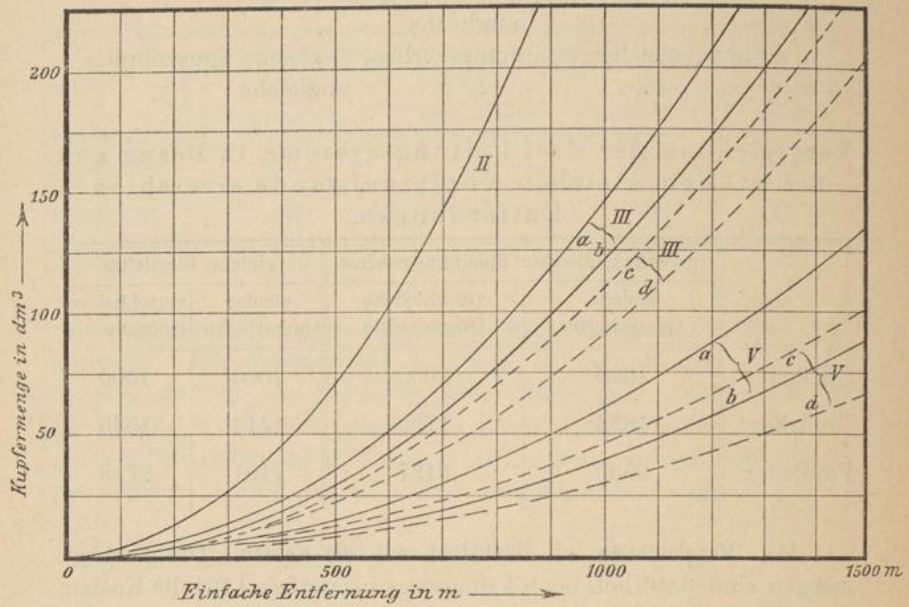


Fig. 116. Kosten der Leitungen in Abhängigkeit von der Entfernung
bei oberirdischer Verlegung.
 $\mathcal{E} = 1000$ Watt.

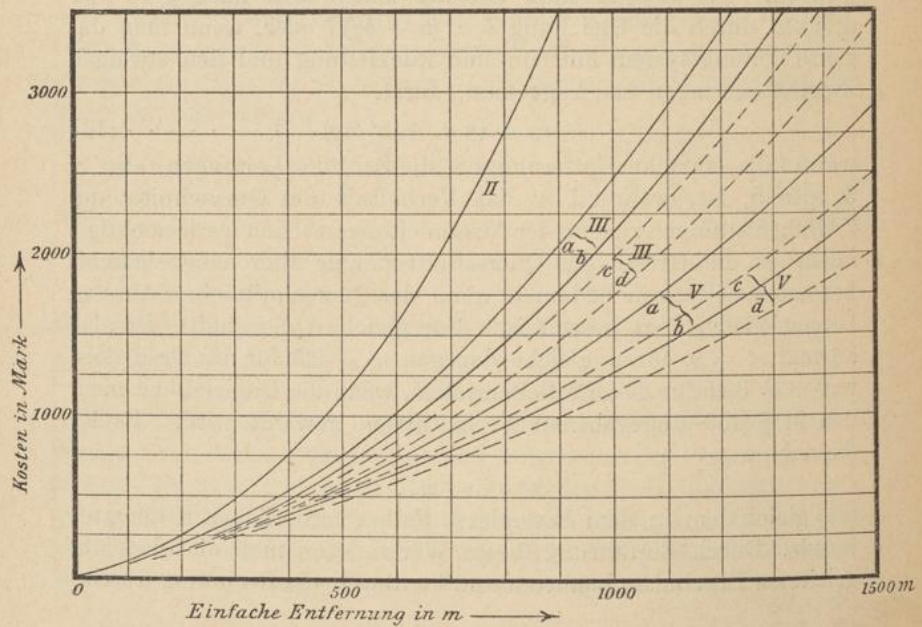


Fig. 117. Kosten der Leitungen in Abhängigkeit von der Entfernung bei unterirdischer Verlegung.
 $\mathcal{E} = 1000$ Watt.

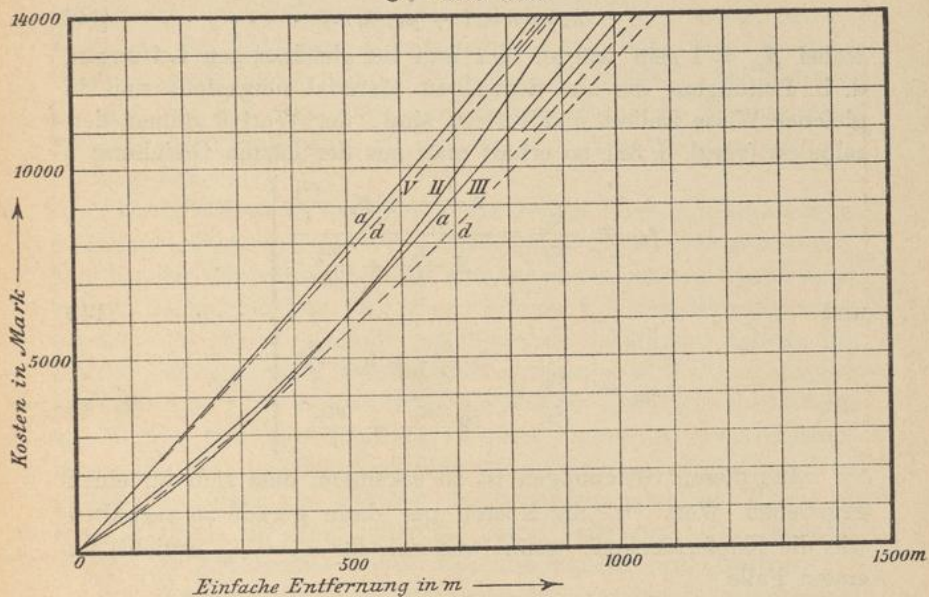
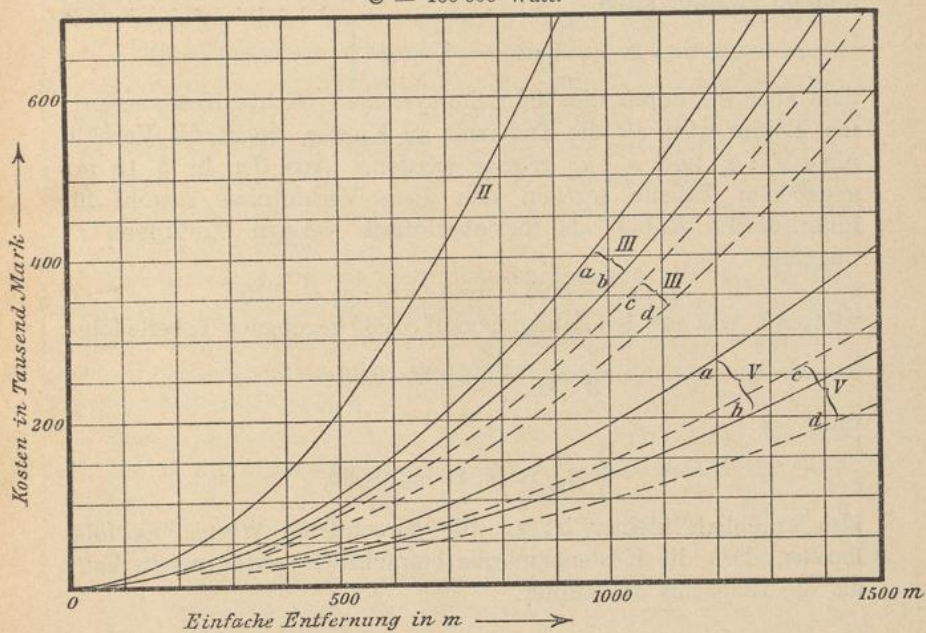


Fig. 118. Kosten der Leitungen in Abhängigkeit von der Entfernung bei unterirdischer Verlegung.
 $\mathcal{E} = 100\,000$ Watt.



fachen; man erhält nämlich dann unter Berücksichtigung der in § 139 festgestellten Beziehung $M_n = \mu_{n2} M_2$ allgemein

$$k_n = n a_n l + \mu_{n2} b_n m_2 \dots \dots \dots (142)$$

wobei $\mu_{22} = 1$ sein würde. Da nun bei gleichartigen Leitungen, d. h. Leitungen, die aus demselben Material hergestellt und in gleicher Weise isoliert und verlegt sind, der Wert b immer derselbe ist (vergl. S. 32), so erhält man aus der letzten Gleichung

$$x_{32} = \frac{k_3}{k_2} = \frac{3 \frac{a_3}{b} + \mu_{32} \frac{m_2}{l}}{2 \frac{a_2}{b} + \frac{m_2}{l}}$$

und

$$x_{52} = \frac{k_5}{k_2} = \frac{5 \frac{a_5}{b} + \mu_{52} \frac{m_2}{l}}{2 \frac{a_2}{b} + \frac{m_2}{l}} \dots \dots \dots (143)$$

Aus diesen Gleichungen ist zu erkennen, dass sich für einen gegebenen Wert m_2/l die Kosten nur dann gerade so verhalten wie die Kupfermengen, wenn (was sich für $x_{32} = \mu_{32}$ ergibt) im ersten Falle

$$a_3 : a_2 = \frac{2}{3} \mu_{32} \dots \dots \dots (144)$$

und im zweiten Falle

$$a_5 : a_2 = \frac{2}{5} \mu_{52}$$

dass aber die durch die Mehrleitersysteme erreichte Kostenersparnis kleiner wird als die Ersparnis an Kupfer, wenn die Verhältnisse $a_3 : a_2$ und $a_5 : a_2$ grösser werden. Aus der in § 19 angegebenen Tabelle ergeben sich diese Verhältnisse sowohl für unterirdische Kabel als für oberirdisch verlegte Leitungen zu ungefähr

$$a_3 : a_2 = 0,85 \quad \text{und} \quad a_5 : a_2 = 0,75$$

während, was aus den Zahlen der auf S. 230 gegebenen Tabelle folgt,

$$\frac{2}{3} \mu_{32} = 0,21 \text{ bis } 0,33$$

und

$$\frac{2}{5} \mu_{52} = 0,041 \text{ bis } 0,083,$$

also erheblich kleiner ist als die berechneten Werte. Es folgt daraus, dass die Kostenersparnis beträchtlich geringer sein kann als die Ersparnis an Kupfer.

Das Verhältnis der Kosten wird aber, wie Gleichung (143) lehrt, ausserdem durch die Grösse $m_{2/l}$, also die beim Zweileitersystem auf 1 m Entfernung zu verwendende Kupfermenge, beeinflusst, die bei gegebener Leitungslänge proportional dem zu übertragenden Effekte ist (vergl. Gleichung (27) in § 46). Der Einfluss ist offenbar der, dass mit wachsendem $m_{2/l}$, also wachsendem Effekte, die Verhältnisse α_{32} und α_{52} sich den Verhältnissen μ_{32} und μ_{52} nähern.

Um alle diese Beziehungen ohne weitere Rechnung illustrieren zu können, sind die Kurven der drei Figuren 116 bis 118 gezeichnet. Der bei der Berechnung dieser Kurven angenommene Spannungsverlust ist, wie in Fig. 115, gleich 2% bei 110 Volt Nutzspannung gesetzt; die in der Tabelle auf Seite 32 fehlenden Zahlen für blanke Leitungen sind in der Rechnung zu $\alpha_3 = 0,19$ und $\alpha_5 = 0,154$ angenommen. Die Bezeichnung der Kurven ist in derselben Weise wie in Fig. 115 durchgeführt. In allen Figuren ist der Abscissenmassstab derselbe, während der Ordinatenmassstab jedesmal so gewählt ist, dass die für das Zweileitersystem gültige Kurve in allen Figuren ungefähr dieselbe Lage beibehält. Die Kurven bringen u. A. folgende Thatsachen anschaulich zum Ausdruck:

1. Während durch die Mehrleitersysteme eine Kupferersparnis unter allen Umständen erzielt wurde (vergl. Fig. 115), können die Kosten der Mehrleitersysteme bei geringeren Entfernungen grösser sein als beim Zweileitersystem (vergl. Fig. 116 und 117).

2. Eine Kostenersparnis ist bei oberirdischen Leitungen schon bei viel geringeren Entfernungen zu erreichen als bei unterirdischen (vergl. Fig. 116 mit Fig. 117. — Die Kurven in Fig. 116 konnten nicht zum Schnitt gebracht werden, weil die Zeichnung sonst zu undeutlich geworden wäre. Dass sie sich aber teilweise schneiden müssen, ist aus der Richtung zu erkennen, die sie in der Gegend des Nullpunktes haben).

3) Die Verhältnisse ändern sich zu Gunsten der Mehrleitersysteme, je grösser der zu übertragende Effekt ist (vergl. Fig. 118 mit Fig. 117). In Fig. 118 hat die Kostenersparnis schon annähernd ihren grössten Wert erreicht, denn die Kurven sind denen der Fig. 115 sehr ähnlich.

Die praktischen Schlüsse über die Anwendbarkeit der verschiedenen Systeme ergeben sich aus diesen Feststellungen von selbst.