

Badische Landesbibliothek Karlsruhe

Digitale Sammlung der Badischen Landesbibliothek Karlsruhe

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

Teichmüller, Joachim

Stuttgart, 1898

V. Rechnungen an fertigen Leitungsnetzen

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

schon bei dem Entwerfen des Netzes den später zu beachtenden Forderungen Rechnung tragen. Die behandelten Rechenmethoden verlieren für ihn vielfach an praktischem Wert, wenn es sich darum handelt ein Netz vorauszuberechnen, aber erst durch die Betrachtung dieser Methoden konnte der Einblick in die Wirkungsweise eines Leitungsnetzes in seinen einzelnen Teilen und als Ganzes gewonnen werden, der die Befähigung zur freieren Behandlung der Probleme gewährte.

Ein gutes Leitungsnetz gleicht einem Kunstwerk, das um so vollkommener ist, je mehr es der Künstler verstanden hat, alles nebeneinander zu sehen, was der Ungeübte nur langsam voranschreitend erblicken und berücksichtigen konnte.

V. Rechnungen an fertigen Leitungsnetzen.

123. Die Beurteilung projektierter Netze. Zu besonderer Bedeutung gelangen die Rechnungen zur Bestimmung der Stromverteilung*), wenn es sich darum handelt, ein im Projekte fertiges Netz auf seinen Wert zu prüfen, etwa in dem Falle, dass Projekte, die von verschiedenen Firmen auf gleicher Grundlage ausgearbeitet wurden, mit einander verglichen werden sollen. Der technische Wert der Netze ist dann — gleiche Vollkommenheit in der Ausführung vorausgesetzt — wesentlich nach ihrer Elastizität und der Stromdichte in den einzelnen Leitungen zu beurteilen. Die Prüfung auf Elastizität zerfällt in eine Berechnung des Spannungsverlustes unter Annahme gleicher Spannung an den Speisepunkten und eine Prüfung auf Ausgleich unter Zugrundelegung gewisser Schwankungen in der Belastung der Speisepunkte. Beiden Untersuchungen muss die Bestimmung der Stromverteilung vorausgehen. Da nun für die Berechnung der Netze genaue Unterlagen gegeben waren, so ist es jetzt auch am Platze, die Bestimmung der Stromverteilung im Netze genau vorzunehmen, annähernd mit dem

*) Ausser durch Rechnung kann die Stromverteilung auch durch Messung an einem Modell bestimmt werden. Das ganze Leitungsnetz mit den Speiseleitungen wird zu diesem Zwecke durch Widerstände nachgebildet, die ein bestimmtes Vielfache, etwa das Hundertfache der Leitungs- und Nutzwiderstände darstellen. Der Spannungsverlust kann dann mit Hilfe eines Spannungsmessers von hohem Widerstande direkt gemessen werden. Dieses Verfahren wurde in den achtziger Jahren, als die ersten Zentralen gebaut wurden, ziemlich viel angewendet, ist aber mit der Ausbildung der rechnerischen Methoden durch diese verdrängt worden. Eine interessante graphische Methode bringt J. Herzog in der *ETZ* 1893, S. 10.

Grade der Genauigkeit, der in den Beispielen des § 91 erzielt ist. Dasselbe gilt von der hierauf vorzunehmenden Prüfung auf Ausgleich, die sehr sorgfältig erfolgen muss, wenn die Netze richtig beurteilt werden sollen. Bei der Untersuchung auf Stromdichte kann man sich dagegen sehr häufig mit Stichrechnungen nach § 98 begnügen, da die Stromdichte bei elastischen Leitungsnetzen im allgemeinen sehr klein ist.

124. Dauernde Prüfung im Betriebe befindlicher Netze. Für die Verwaltung von Elektrizitätswerken erwächst die Aufgabe, das Leitungsnetz in Bezug auf Elastizität und Stromdichte unter dauernder Kontrolle zu halten, so dass die Leistungsfähigkeit des Netzes in beiderlei Hinsicht stets bekannt ist, wie sich auch mit der Zeit die Belastung ändern mag. Die Unterlagen sind in diesem Falle nicht so genau, wie im Falle des vorigen Paragraphen, da wohl die installierte, nicht aber die tatsächliche Belastung zur Zeit der maximalen Beanspruchung — denn um diese handelt es sich fast ausschliesslich — bekannt ist.

Jedoch lässt sich die letztere aus der ersteren genau genug schätzen, dass auch in diesem Falle eine ebenso sorgfältige Bestimmung der Stromverteilung gerechtfertigt ist, wie bei der Prüfung projektierter Netze; die Abschätzung der tatsächlichen Belastung wird in einigen Zentralen durch Messung der einzelnen Speiseströme unterstützt.

Die Umständlichkeit der genauen Bestimmung etwa zu scheuen, ist hier um so weniger am Platze, als die Rechnungen sehr leicht so eingerichtet werden können, dass sie von bleibendem Werte für die Ueberwachung der Anlage sind.

Eine besondere Beachtung verdient der Umstand, dass die Spannungen an den einzelnen Speisepunkten während des Betriebes beobachtet werden können. Diese Beobachtung macht eine Berechnung auf Ausgleich unnötig, andererseits muss sie einen Einfluss auf die Bestimmung der Stromverteilung ausüben, denn es ist nötig, die beobachteten Werte der Speisepunktsspannungen bei der Rechnung zu berücksichtigen. Das geschieht auf folgende Weise:

Das Gleichungssystem (48) auf Seite 137 ändert sich jetzt durch Annahme verschiedener Spannungen E_I , E_{II} und E_{III} an den Speisepunkten in der Weise, dass E_0 in der ersten Gleichung durch E_I , in der zweiten durch E_{II} u. s. f. ersetzt ist. Addiert man zu diesen drei Gleichungen, wie es an der citierten Stelle geschehen ist, drei identische Gleichungen, in denen jedes Glied den Faktor E_I (also nicht etwa in der zweiten Gleichung E_{II} u. s. f.)

anstelle des dort gebrauchten E_o enthält, so ergibt sich folgendes Gleichungssystem:

$$\left. \begin{aligned} + \epsilon_{Ia} \sum_a \frac{1}{R} - \frac{\epsilon_{Ib}}{R_{ab}} & \quad - \frac{\epsilon_{Ic}}{R_{ac}} & - J_a & = 0 \\ - \frac{\epsilon_{Ia}}{R_{ab}} & + \epsilon_{Ib} \sum_b \frac{1}{R} - \frac{\epsilon_{Ic}}{R_{bc}} & - J_b - \frac{\epsilon_{I II}}{R_{b II}} & = 0 \\ - \frac{\epsilon_{Ia}}{R_{ac}} & - \frac{\epsilon_{Ib}}{R_{bc}} & + \epsilon_{Ic} \sum_c \frac{1}{R} - J_c - \frac{\epsilon_{I III}}{R_{c III}} & = 0 \end{aligned} \right\} (106)$$

Es bedeutet hierin ϵ_{Ia} den Spannungsunterschied zwischen den Spannungen E_I und E_a , $\epsilon_{I II}$ den Unterschied zwischen E_I und E_{II} u. s. f., und zwar ist ϵ_{Ia} positiv, wenn $E_I > E_a$ ist. Das Ergebnis hätte sich übrigens auch ohne Rechnung, einfach durch Anwendung des Satzes von der Superposition der Klemmenspannungen ableiten lassen. — Die letzten Glieder der zweiten und dritten Gleichung lassen sich aus den beobachteten Speisepunktsspannungen berechnen; sie treten in der Rechnung genau so auf, als ob die Knotenpunktbelastungen J_b und J_c um ihren Betrag erhöht oder vermindert wären, je nachdem $\epsilon_{I II}$ u. s. f. positiv oder negativ ist. Nunmehr kann die Rechnung genau nach dem früher (§ 87 u. f.) angegebenen Verfahren vorgenommen werden.

Die Seidelsche Methode gestattet, die Stromverteilung sehr bequem für beliebige Knotenpunktbelastungen zu berechnen; die für den einen Fall ermittelten Unbekannten können als erste Näherungswerte für die nächste Gleichungslösung mit anderen Belastungen angenommen werden. Um aber eine neue Auflösung des Systemes für neue Belastungen zu vermeiden, empfiehlt es sich, folgendes Verfahren einzuschlagen: Man bestimmt die Stromverteilung unter der Annahme, dass jedesmal nur ein Knotenpunkt mit einer Stromstärke von 100 Amp belastet sei — die Rechnung ist also sovielmals durchzuführen, als Knotenpunkte vorhanden sind — und stellt in einer Tabelle die Ströme zusammen, die die einzelnen Leitungen jeweils zu führen haben; die Stromrichtung ist hierbei positiv in der Richtung der Leitungsbezeichnung ($a b$, $b c$, u. s. f.) anzunehmen. Will man aus dieser Tabelle die Stromverteilung entnehmen, die sich ergeben würde, wenn alle Knotenpunkte gleichzeitig mit je 100 Amp belastet wären, so hat man die Leitungsströme der Einzelfälle sämtlich algebraisch zu addieren. Soll dagegen die Belastung eines Knotenpunktes etwa nur 70 Amp betragen, so sind die Leitungsströme, die sich für seine Einzelbelastung mit 100 Amp ergeben hatten, zuerst mit 0,7 zu multiplizieren und dann mit den übrigen, die, wenn nötig, ebenfalls durch Multiplikation mit einem Faktor geändert sind, zu addieren.

Beispiel. Für das auf Seite 148 behandelte Beispiel ergibt sich folgende, mit übermässiger Genauigkeit berechnete Tabelle:

Tabelle der Leitungsströme unter der Annahme, dass die einzelnen Knotenpunkte mit 100 Amp belastet seien.

Belastet ist Knotenpunkt	Leitungsströme in Amp in der Leitung					
	<i>Ia</i>	<i>IIb</i>	<i>IIIc</i>	<i>ab</i>	<i>bc</i>	<i>ca</i>
<i>a</i>	+ 67,04	+ 12,68	+ 20,28	- 12,98	- 0,30	+ 19,98
<i>b</i>	+ 30,40	+ 43,71	+ 25,91	+ 26,34	- 29,96	- 4,05
<i>c</i>	+ 29,72	+ 15,84	+ 54,44	+ 2,92	+ 18,76	- 26,80
<i>a, b, c</i> gleichzeitig	+127,16	+ 72,23	+100,63	+ 16,28	- 11,5	- 10,87

Will man die Stromverteilung für die in Fig. 84, Seite 148, dargestellte Belastung feststellen, so ist die erste Zeile der Tabelle mit 0,8, die zweite mit 0,2, und die dritte mit 0,65 zu multiplizieren; es ergeben sich dann die Leitungsströme

Belastet ist Knotenpunkt	<i>Ia</i>	<i>IIb</i>	<i>IIIc</i>	<i>ab</i>	<i>bc</i>	<i>ca</i>
<i>a</i>	+ 53,63	+ 10,14	+ 16,22	- 10,38	- 0,24	+ 15,98
<i>b</i>	+ 6,08	+ 8,74	+ 5,18	+ 5,27	- 5,99	- 0,81
<i>c</i>	+ 19,32	+ 10,3	+ 35,39	+ 1,90	+ 12,19	- 17,42
<i>a, b, c</i> gleichzeitig	+ 79,03	+ 29,18	+ 56,79	- 3,21	+ 5,96	- 2,25

Das in der letzten Zeile erhaltene Ergebnis stimmt mit der in Fig. 85 angegebenen Stromverteilung hinreichend genau überein.

Um die Verschiedenheit der Spannungen an den Speisepunkten zu berücksichtigen, kann man in ähnlicher Weise Tabellen zusammenstellen, die für Spannungsunterschiede zwischen einem bestimmten und allen andern Speisepunkten etwa von 1 Volt berechnet sind, doch kann man diese Tabelle sparen, wenn man, wie oben [vergl. auch Gleichung (106)] angegeben ist, den Einfluss

der Spannungsverschiedenheit durch eine Aenderung in der Belastung der den Speisepunkten benachbarten Knotenpunkte ausgedrückt. Die Spannungsverluste an den einzelnen Knotenpunkten, die zur Aufstellung der obigen Stromtabellen bekannt waren, können schliesslich ebenfalls ganz ähnlich wie oben die Leitungsströme tabellarisch zusammengestellt werden. Dass man zum Schlusse stets von der Knotenpunktblastung auf die wahre Belastung der einzelnen Leitungen zurückgehen muss, ist selbstverständlich; vergl. § 89, 2.

125. Ergänzungen und Erweiterungen im Betriebe befindlicher Netze.

Ueber die wichtigsten Ergänzungen und Erweiterungen, die bei einem verlegten Netze im Laufe der Zeit durch Anwachsen des Bedürfnisses nach elektrischer Energie nötig werden, und über ihre rechnerische Behandlung soll hier ein kurzer Ueberblick gewährt werden. Die Ueberlegungen gelten der Hauptsache nach auch für die Behandlung von Aenderungen an projektierten Netzen.

1. Die Vergrösserung eines Querschnitts. Das Mass einer Querschnittsvergrösserung, die infolge zu hoher Stromdichte oder zu hohen Spannungsverlustes nötig werden kann, ist abzuschätzen und danach die Stromverteilung von neuem zu bestimmen. In dem Gleichungssysteme von der Form der Gleichungen (49) auf Seite 138, die zu der ersten Bestimmung benutzt waren, ändert sich nur ein Wert R . Wenige Durchrechnungen nach der Seidelschen Methode unter Benutzung der früheren Lösungen als erster Annäherungswerte werden die neuen Werte der Unbekannten mit hinreichender Genauigkeit ergeben; vergl. § 93.

2. Die Verlegung einer neuen Leitung zwischen zwei Kreuzungspunkten. Verbindet die neue Leitung zwei unmittelbar benachbarte, also schon direkt verbundene Kreuzungspunkte, so ist die Aufgabe identisch mit der vorigen. Sind die zu verbindenden Punkte aber nicht unmittelbar benachbart, wie z. B. die Punkte b und i in Fig. 86, so tritt, wenn beide Knotenpunkte sind, in die für den einen Punkt (z. B. b) aufgestellte Gleichung ein Glied mit dem Spannungsverlust des andern (z. B. i) ein, und umgekehrt. Die Neurechnung des Gleichungssystems vollzieht sich in derselben einfachen Weise, wie im vorigen Falle. Ist der eine der beiden Punkte ein Speisepunkt, so ändert sich bei Annahme von Spannungsgleichheit an allen Speisepunkten nur die Summe der Leitungsfähigkeiten, die nach Gleichung (49) als Faktor des Spannungsverlustes an dem betrachteten Knotenpunkte auftritt. Bei Ungleichheit der Spannungen tritt gemäss Gleichung (106) ein Glied von bekanntem Werte in die Gleichung des betrachteten Knotenpunktes ein. Es ist möglich, dass durch eine neue Leitung zwei

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.