

Badische Landesbibliothek Karlsruhe

Digitale Sammlung der Badischen Landesbibliothek Karlsruhe

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

Teichmüller, Joachim

Stuttgart, 1898

I. Die Hintereinanderschaltung (Reihenschaltung) von Widerständen

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

fachen Stromkreises ist hiermit aber nicht gegeben, wird vielmehr erst erhalten, wenn beliebig viele Nutzwiderstände oder sonstige Stromempfänger mit einzelnen Leitungsstücken hintereinander geschaltet sind, wie es in Fig. 4 gezeichnet ist. Die Betrachtung dieses Falles ist mit der oben gegebenen Erklärung noch nicht erschöpft, sondern verlangt ausführlichere Auseinandersetzungen.

I. Die Hintereinanderschaltung (Reihenschaltung) von Widerständen.

21. Die Spannungsverteilung in hintereinander geschalteten Widerständen. Nutzwiderstände oder andere Stromempfänger dürfen nur dann hintereinandergeschaltet werden, wenn alle bei derselben Stromstärke normal funktionieren, denn in einem einfachen Stromkreise kann nur eine Stromstärke herrschen. Die Stromstärke ist also, wenn nicht eine gegebene, so doch überall dieselbe einzige Grösse. Der Effektverbrauch in den einzelnen Nutzwiderständen ist deshalb proportional den Spannungsdifferenzen an ihren Klemmen.

Wir nehmen an, wir stünden vor einer fertigen Anlage, die Nutzwiderstände W und die Leitungswiderstände R seien also gegeben. Die Spannung zwischen den Klemmen K des gesamten Stromkreises, der Strom und die Widerstände stehen dann in der Beziehung

$$J \cdot (\Sigma R + \Sigma W) = E \dots \dots \dots (1)$$

womit gesagt ist, dass die Reihenfolge der Widerstände willkürlich ist, d. h. es wird an der Stromstärke und dem Effektverbrauche in den einzelnen Widerständen nichts geändert, wenn alle Leitungsstücke für sich und alle Nutzwiderstände für sich hintereinandergeschaltet werden. Und hieraus folgt, dass es gleichgültig ist, ob es sich um eine räumliche Verteilung des elektrischen Effektes oder um eine einfache Uebertragung des Effektes von der Erzeugungsstelle nach einer bestimmten Verbrauchsstelle handelt. Ein Unterschied hierin ist bei der Hintereinanderschaltung nicht zu machen.

Die letzte Gleichung in der Form

$$\Sigma J R + \Sigma J W = E = \Sigma E_R + \Sigma E_W \dots \dots \dots (2)$$

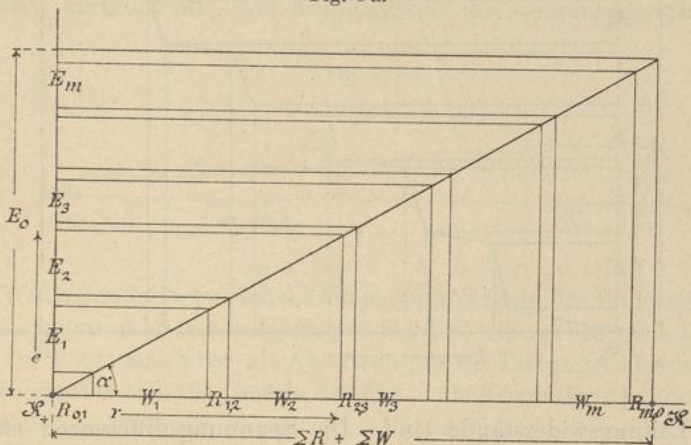
sagt aus, dass die Gesamt-Klemmenspannung gleich der Summe der Spannungsdifferenzen zwischen den Klemmen der einzelnen Widerstände ist. Fasst man einen bestimmten Punkt des Stromkreises ins Auge, z. B. die Klemme K_+ und misst von hier aus die Widerstände und die Spannungsdifferenzen zwischen

diesem und irgend einem beliebigen Punkte des Stromkreises, so ergibt sich als Ausdruck für die Abhängigkeit der Spannungsdifferenz vom Widerstande die Gleichung

$$e = \text{const. } r \dots \dots \dots (3)$$

worin e die veränderliche Spannungsdifferenz und r den veränderlichen Widerstand, sowohl den Leitungs- als den Nutzwiderstand

Fig. 5 a.



bedeuten sollen.*) Die Kurve dieser Abhängigkeit ist also eine Gerade, vergl. Fig. 5 a. Die Neigung dieser Geraden gegen die Abszissenachse giebt ein Mass für die Stromstärke, denn es ist

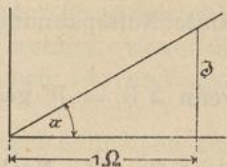
$$a = \text{arctg} \frac{E}{\Sigma R + \Sigma W}$$

oder

$$J = \text{tg } a \dots \dots \dots (4)$$

Die Ordinate, die der Abszisse $r = 1 \Omega$ entspricht, ist gleich der Stromstärke J in Amp, wenn E in Volt gemessen und aufgetragen ist, vergl. Fig. 5 b. Trägt man, wie es in der Figur geschehen ist, auf der Abszissenachse die einzelnen Widerstände der Reihe nach an, so ergeben die in den Endpunkten errichteten Ordinaten die Spannungsdifferenzen bis zur Klemme K_+ , und die Ordinatendifferenzen die Spannungsdifferenzen zwischen den entsprechenden Widerstandspunkten.

Fig. 5 b.

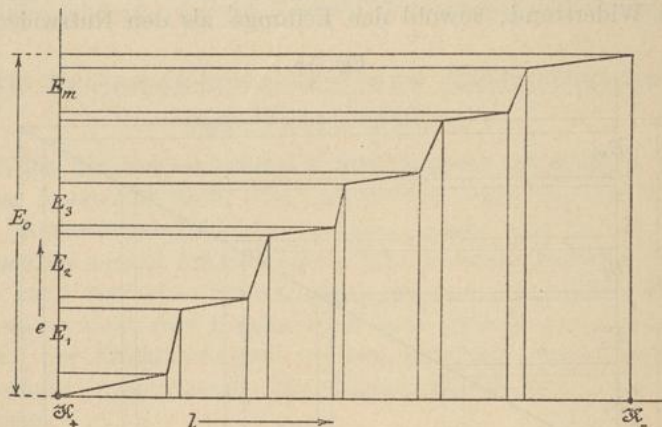


Würde man statt des Widerstandes die Länge der Leitung

*) e und r sind klein geschrieben, um diese Grössen als veränderliche zu kennzeichnen.

als Abscissen auftragen, so würde sich das Bild der Fig. 6 ergeben, unter der den Thatsachen entsprechenden Annahme, dass die Leitungen der Nutzwiderstände sehr kurz im Vergleich zu denen

Fig. 6.



der Leitungswiderstände sind. Die Spannungsdifferenzen an der Ordinatenachse sind offenbar dieselben wie die in der vorigen Abbildung.

22. Nutzsannung und Spannungsverlust. Unter diesen Spannungsdifferenzen kann man einen charakteristischen Unterschied machen; man kann nämlich unterscheiden zwischen den Spannungsdifferenzen an den Klemmen der einzelnen Nutzwiderstände und denen an den Klemmen der Leitungswiderstände. Die ersteren geben multipliziert mit der Stromstärke den nützlich umgesetzten Effekt, und können deshalb Nutzsannungen genannt werden, die letzteren stellen im analogen Produkte den Effektverlust in den Leitungen dar und sollen deshalb Spannungsverluste heissen. Die gesamte Nutzsannung ist

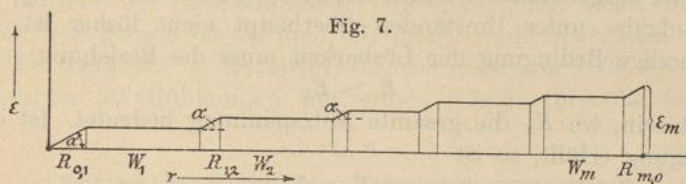
$$E_N = \Sigma J W = J \cdot W \dots \dots \dots (5)$$

wenn $\Sigma W = W$ gesetzt wird, der gesamte Spannungsverlust ist

$$\epsilon = \Sigma J R = J R \dots \dots \dots (6)$$

für $\Sigma R = R$. Nach dieser letzten Gleichung kann man sich sämtliche Nutzwiderstände kurzgeschlossen denken und erhält dann die wahre Stromstärke J , wenn man in dem Stromkreise eine EMK von der Höhe des Spannungsverlustes ϵ wirken lässt.

Die Kurven der Nutzspannung sowohl als die des Spannungsverlustes sind natürlich wieder Gerade, die durch den Nullpunkt des Koordinatensystemes gehen. Die erstere der beiden Kurven hat keine Bedeutung, da uns die Art des Spannungsabfalles im Nutzwiderstande im allgemeinen gleichgültig ist, um so mehr verdient die Kurve des Spannungsverlustes Beachtung, da sie später in komplizierteren Fällen die Anschauung wesentlich zu erleichtern geeignet ist. Die Abhängigkeit des Spannungsverlustes

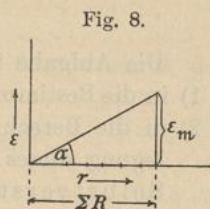


vom Widerstande ist zunächst, wenn als Abscissen die Widerstände des Gesamtstromkreises aufgetragen werden, eine gebrochene Linie (Fig. 7). Trägt man aber als Abscissen nur die Leitungswiderstände auf, so ergibt sich die Gerade der Fig. 8 als Kurve des Spannungsverlustes.

Es möge hier beachtet werden, dass die Grössen JW und JR gerade so auftreten wie EMK 'te von einer der Gesamtklemmenspannung entgegengesetzten Richtung. Es kann z. B. an Stelle irgend eines Nutzwiderstandes eine Maschine eingeschaltet werden, deren EM Gegenkraft gleich aber entgegengesetzt der Nutzspannung dieses Widerstandes ist; die Verhältnisse im Stromkreise werden hierdurch im übrigen in keiner Weise beeinflusst. Wegen dieser Gleichwertigkeit kann eine solche Maschine, wie alle Stromempfänger auch ohne Gefahr als Nutzwiderstand bezeichnet werden. Die Werte JW und JR müssen nach dieser Anschauungsweise negativ eingeführt werden, wenn die gesamte Klemmenspannung positiv angenommen ist, und man gelangt zu dem Satze:

Die Spannungsdifferenzen halten den Produkten aus Strom und Widerstand das Gleichgewicht.

Es ist oft von Wert, gerade den Spannungsverlust als eine Reaktion gegen die eingeführte EMK , als eine Grösse, die einer Spannungsdifferenz das Gleichgewicht hält, aufzufassen. Ein Analogon findet diese Anschauung in der Mechanik, wo die Reibung



eines auf horizontaler Unterlage bewegten Körpers als eine der bewegendenden Kraft gleiche und entgegengesetzte Kraft aufgefasst wird.

23. Berechnung einer Leitung. Soll nun die Aufgabe gestellt werden, für eine Reihe von gegebenen Stromempfängern — die natürlich nicht nur ihrem Widerstand oder ihrer *EM* Gegenkraft nach, sondern auch ihrem normalen Stromverbrauche nach gegeben sind — die Leitung zu berechnen, mit der sie in den Stromkreis einer gegebenen *EMK* oder Klemmenspannung *E* hintereinander eingeschaltet werden sollen, so erkennt man sofort, dass die Aufgabe unter Umständen überhaupt nicht lösbar ist. Als notwendige Bedingung der Lösbarkeit muss die Beziehung

$$E_0 > E_N$$

erfüllt sein, wo E_N die gesamte Nutzspannung bedeutet. Ist diese Bedingung erfüllt, so ist

$$\varepsilon = E_0 - E_N \dots \dots \dots (7)$$

der Spannungsverlust, der in der Leitung auftreten muss, wenn die Aufgabe gelöst werden soll. Aus dem oben gefundenen Werte für ε ergibt sich

$$R = \frac{\varepsilon}{J} \dots \dots \dots (8a)$$

als der gesuchte Wert des Leitungswiderstandes, oder, da die Länge der Leitung als gegebene Grösse anzusehen ist, für die nach Wahl des Leitungsmaterials einzig übrig bleibende Unbekannte.

$$Q = \frac{JL}{\varepsilon} q \dots \dots \dots (8b)$$

Die Aufgabe ist also in zwei Teile zerfallen, nämlich

- 1) in die Bestimmung des erforderlichen Spannungsverlustes ε und
- 2) in die Berechnung des Leitungsquerschnitts unter Zugrundelegung dieses Spannungsverlustes.

Selbstverständlich muss zur Lösung der Aufgabe, wie zu jeder Leitungsberechnung, der Strom, den die Leitung zu führen hat, gegeben sein.

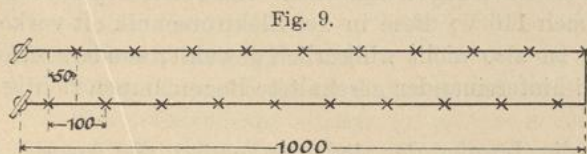
Ist die Bedingung $E_0 > E_N$ nicht von vorn herein erfüllt, so muss entweder die Gesamtklemmenspannung, die Betriebsspannung, E_0 erhöht oder die Zahl der Stromempfänger vermindert werden.

Wir haben hiermit eine neue Berechnungsart der elektrischen Leitungen kennen gelernt, die mit der in § 17 behandelten, bei der die Erwärmung der Leitung zu Grunde gelegt wurde, gar nichts zu thun hat. Selbstverständlich muss die Erwärmung einer Leitung unter allen Umständen in den früher gezogenen Grenzen bleiben; es muss deshalb jeder Leitungsberechnung, die unter Zugrundelegung anderer Bedingungen vorgenommen ist, eine Prü-

fung, ob die zulässige Erwärmung, also die zulässige Stromdichte, nicht überschritten ist, folgen.

Da, wie gesagt, die beiden Berechnungsarten, auf Erwärmung und auf Spannungsverlust, die nichts mit einander zu thun haben, doch beide ausgeführt werden müssen, andererseits aber die Betriebsspannung im zweiten Falle bei gegebener Zahl und Art der Stromempfänger nicht willkürlich ist, so kann man die Aufgabe auch so formulieren, dass die Betriebsspannung gesucht wird, die zum Betriebe der Stromempfänger erforderlich ist, wenn die Leitungen sich gerade bis zu dem erlaubten Grade erwärmen.

24. Beispiele. 1. Beispiel: Eine Strasse von 1000 m Länge soll durch 20 Glühlampen mit einem Effektverbrauche von je



55 Watt, nämlich 11 Amp bei 5 Volt möglichst gleichmässig beleuchtet werden. Die Betriebsspannung soll 110 V betragen.

Die Anlage ist schematisch in Fig. 9 dargestellt; auf je 50 m Strassenlänge kommt eine Lampe.

Die Nutzsannung ist

$$E_N = 20 \cdot 5 = 100 \text{ V,}$$

der Spannungsverlust also $\epsilon = 10 \text{ V}$ und es folgt hieraus der Querschnitt

$$Q = \frac{11 \cdot 2000}{10} \cdot 0,0175 = 38,5 \text{ mm}^2$$

wenn die Leitung aus Kupfer hergestellt wird.

Die Leitung ist verhältnismässig sehr dick, und da auch die Stromdichte sehr gering ist, versuchen wir mit einer dünneren Leitung auszukommen. Das kann natürlich nur unter Erhöhung des Spannungsverlustes, also der Betriebsspannung geschehen. Wählen wir einen Durchmesser von 4 mm, so wächst der Spannungsverlust auf

$$\epsilon = \frac{11 \cdot 2000}{12,6} \cdot 0,0175 = 30,5 \text{ V.}$$

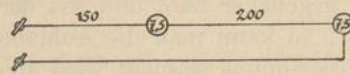
Die Betriebsspannung muss also auf 130,5 V erhöht werden. Ist diese Erhöhung unzulässig, so muss man entweder die Zahl der Lampen verringern, oder andere Lampen, die bei niedriger Spannung und höherer Stromstärke denselben Effekt verbrauchen, verwenden.

Die Stromdichte ist bei Anwendung der Leitung von 4 mm ϕ ungefähr nur 1 Amp, also reichlich klein.

2. Beispiel: Zwei Bogenlampen zu 7,5 Amp sollen nach der in Fig. 10 gegebenen Skizze hintereinander geschaltet werden.

Die Leitung ist zu berechnen.

Fig. 10.



Die Lampen haben bei normalem Brennen eine Klemmenspannung von etwa 45 V, eine Spannung, die mit der Natur des

Lichtbogens zusammenhängt. Sollen die Lampen ruhig brennen, so müssen erfahrungsmässig etwa 20 V in einem vorgeschalteten Widerstande verzehrt werden. Diese 20 V dürfen als Spannungsverlust in den Leitungen auftreten. Als Betriebsspannung ergeben sich hiernach 110 V; diese in der Elektrotechnik oft vorkommende Spannung ist also nicht willkürlich gewählt, sondern erforderlich, wenn zwei hintereinander geschaltete Bogenlampen richtig brennen sollen.

Für die Lösung der Aufgabe genügt die Angabe des notwendigen Spannungsverlustes $\epsilon = 20$ V; dann ergibt sich für eine Kupferleitung der Querschnitt

$$Q = \frac{7,5 \cdot 700}{20} \cdot 0,0175 = 4,6 \text{ mm}^2.$$

Mit Rücksicht auf die Erwärmung dürfte die Leitung einen kleineren Querschnitt haben, denn in geschlossenen Räumen würde ein Durchmesser von

$$D = \left(\frac{7,5}{4,5} \right)^{\frac{2}{3}} = 1,405 \text{ mm},$$

entsprechend einem Querschnitt von 1,55 mm², genügen.

Hierbei ist aber zu berücksichtigen, dass die Bogenlampen kurz nach dem Einschalten mit einem höheren Strome brennen als im normalen Betriebe; dieser Anfangsstrom kann das Zweifache des normalen Stromes und darüber betragen. Um dies bei der Berechnung auf Erwärmung zu berücksichtigen, soll man etwa den doppelten Strom in die Rechnung einsetzen. Die mögliche noch höhere Stromstärke anzunehmen, ist deshalb nicht nötig, weil die Dauer des übernormalen Stromes doch nur gering ist. Im vorliegenden Falle wäre also an Stelle des Durchmessers von 1,405 mm ein solcher von ungefähr 2,23 mm mit Rücksicht auf Erwärmung zu fordern.

Ist die Leitung im Freien auf Isolatoren und Gestängen zu verlegen, so ist die berechnete Leitung zu dünn, als dass sie hinreichend grosse Spannweiten vertragen könnte. Es fragt sich, ob

man hier nicht vorteilhaft Eisendraht verwendet, der billiger ist und eine grössere Festigkeit besitzt als Kupferdraht. Eine Eisenleitung würde einen Querschnitt von

$$Q = \frac{7,5 \cdot 700}{20} \cdot 0,1 = 26,2 \text{ mm}^2$$

haben müssen. Will man diesen Draht als zu stark nicht verwenden, so kann man die Leitung zum Teil aus Kupfer und zum Teil aus Eisen herstellen. Wird die Hinleitung aus Kupferdraht von 4 mm Φ gewählt, so tritt in dieser ein Spannungsverlust von 3,65 V auf, es bleiben also 16,35 V für die andere Leitungshälfte in Eisen, dessen Querschnitt sich also zu

$$Q = \frac{7,5 \cdot 350}{16,35} \cdot 0,1 = 16 \text{ mm}^2$$

ergiebt.

Die Anlage würde also erfordern

350 m Kupferdraht zu 4 mm Φ und

350 „ Eisendraht „ 4,5 „ „

In beiden Leitern bleibt die Erwärmung in mässigen Grenzen.

Die Drähte werden i. A. nicht genau in der berechneten Stärke vorrätig sein; man hat sich nach den Fabrikationsnummern zu richten. Da sich ausserdem die Länge der Leitung vorher nicht genau festsetzen lässt, und auch der spezifische Widerstand des Metalles etwas von der Annahme abweichen kann, so kann man nicht erwarten, den vorgeschriebenen Spannungsverlust von 20 V mit hinreichender Genauigkeit in der Leitung zu erhalten. Man rundet deshalb die Querschnitte auf und schaltet einen besonderen Widerstand, den sogenannten Vorschaltwiderstand der Bogenlampen, in die Leitung ein, der an Ort und Stelle so verändert werden kann, dass der notwendige Spannungsverlust genau erreicht wird, dass also die Lampen ruhig brennen.

25. Veränderlichkeit der Zahl der Stromempfänger. Wir haben bisher angenommen, dass der Stromkreis in Bezug auf Widerstand, Stromstärke und Spannung unveränderlich sei, dass die Zahl der eingeschalteten Stromempfänger stets dieselbe sei. Dies aber als Bedingung für eine praktische Anlage allgemein fordern zu wollen, wäre abgeschmackt; man kann z. B. niemand zwingen wollen, entweder sämtliche in seinem Hause installierten Lampen brennen zu lassen oder keine einzige. Wir müssen also eine Veränderung der Zahl der eingeschalteten Stromempfänger zulassen. Mit der Veränderung dieser Zahl ist aber eine Aenderung der Stromstärke verbunden. Durch Ausschaltung einer Lampe — die natürlich so erfolgen muss, dass der Zusammenhang des Stromkreises nicht unter-

brochen wird, also durch widerstandslose Verbindung (Kurzschliessen) seiner Klemmen — wird der Gesamtwiderstand verringert, und die Stromstärke wächst, das Zuschalten hat umgekehrt eine Stromschwächung zur Folge.

Diese Stromschwankungen sind, abgesehen von der Gefahr, die für die Stromempfänger mit dem übermässigen Anwachsen des Stromes verbunden ist, unzulässig. Sie sind besonders bei Glühlampenbeleuchtung zu vermeiden, da die Leuchtkraft der Lampen sich schon bei geringer Stromänderung so sehr ändert, dass das Auge empfindlich dadurch gestört wird. Die Glühlampen sind in dieser Beziehung die empfindlichsten Nutzwiderstände; es wird deshalb in den folgenden Betrachtungen besonders auf diese Stromempfänger Rücksicht genommen werden.

Der naheliegende Gedanke, die Stromstärke bei Aenderung des Widerstandes im Maschinenhause durch Aenderung der Klemmenspannung oder durch Vor- und Abschalten von Widerstand, sei es von Hand, sei es durch automatische Vorrichtungen, konstant halten zu wollen, ist im allgemeinen nicht ausführbar, jedenfalls aber nicht für Glühlichtanlagen, denn keine Regulierung würde schnell genug wirken, um das Flackern der Lampen zu verhindern. Es fragt sich, ob die Regulierung nicht in den Leitungskreis selbst gelegt werden kann.

26. Die Elastizität einer Anlage. Die Antwort auf diese Frage lässt sich sehr leicht geben: Soll die Ein- oder Ausschaltung eines oder einiger Stromempfänger ohne merklichen Einfluss auf die Stromstärke, also ohne merklichen Einfluss auf das Funktionieren der übrigen Stromempfänger sein, so muss der Widerstand der ersteren gegenüber dem des Gesamtstromkreises sehr klein sein. Elektrische Apparate mit *EM* Gegenkraft sind hierbei durch einen gleichwertigen Widerstand (vergl. § 22) ersetzt zu denken. Die Möglichkeit und der Umfang einer solchen Selbstregulierung hängt also davon ab, wie viel Nutzwiderstände in den Stromkreis eingeschaltet sind oder werden können, und ausserdem davon, wie viele von ihnen aus- und eingeschaltet werden sollen. Im allgemeinen wird man die Zahl der aus- und einschaltbaren Nutzwiderstände nicht irgendwie beschränken dürfen, vielmehr mit den äussersten Fällen rechnen müssen, nämlich dass entweder alle Nutzwiderstände oder keiner (oder nur einer) eingeschaltet ist. Unter dieser Bedingung muss der Leitung allein die Aufgabe der Selbstregulierung zugewiesen werden. Durch diese Selbstregulierung soll also erreicht werden, dass die Anlage in Bezug auf die Zahl der Nutzwiderstände möglichst dehnbar sei, sie soll eine möglichst grosse Elastizität besitzen.

Die Elastizität einer Anlage mit hintereinandergeschalteten Stromempfängern wächst mit Zunahme des Leitungswiderstandes.

Dieser Satz ist eine einfache Folge des Ohmschen Gesetzes, denn bei veränderlichem Nutzwiderstand w von 0 bis W in der Gleichung

$$J = \frac{E}{R + w}$$

wird J dann annähernd konstant bleiben, wenn w verschwindend klein gegenüber R ist. Es ergibt sich also die Regel:

Bei Hintereinanderschaltung sind die Nutzwiderstände möglichst klein, die Leitungswiderstände dagegen möglichst gross zu wählen, wenn die Elastizität der Anlage möglichst gross sein soll.

Die für Hintereinanderschaltung gebauten Lampen haben deshalb auch einen kleinen Widerstand und der verlangte Effekt wird durch eine grosse Stromstärke erreicht. Die in dem Beispiele gewählten Lampen von 5 V und 11 Amp, also ungefähr $0,455 \Omega$, sind derartige für Hintereinanderschaltung gebaute Lampen. In einer Anlage von gegebener Art und Zahl der Nutzwiderstände hängt die Elastizität nur von der Leitung ab; man kann deshalb auch von der Elastizität der Leitungen sprechen.

27. Berechnung einer Leitung mit Rücksicht auf die Elastizität der Anlage. Der Charakter der Glühlampen gestattet eine Aenderung der Stromstärke um etwa 2%, wenn die hierdurch hervorgerufene Aenderung der Lichtintensität in den Grenzen bleiben soll, innerhalb deren auch bei plötzlichen Schwankungen das Auge nicht mehr empfindlich genug ist, um dadurch gestört zu werden. Stellen wir in dem in § 24 durchgeführten ersten Beispiel die Bedingung, dass die Anlage so elastisch sein soll, dass die Stromänderungen nicht mehr als 2% des normalen Stromes betragen können, und dass die Elastizität allein in die Leitung gelegt werden soll, so bestimmt sich Widerstand und Querschnitt der Leitung folgendermassen:

Der Gesamtwiderstand der 20 Glühlampen beträgt

$$W = 0,455 \cdot 20 = 9,1 \Omega.$$

Soll die Stromänderung bei gleichzeitiger Ausschaltung aller Lampen nur 2% betragen, so muss der Widerstand W 2% vom Gesamtwiderstand des Stromkreises ausmachen. Es kommt aber nur darauf an, dass die Grenze von 2% nicht überschritten wird, wenn die Lampenzahl von 1 (nicht von 0) bis 20 geändert wird, denn wie stark der Strom ist, wenn keine Lampe brennt, kann im allgemeinen gleichgültig sein, vorausgesetzt, dass die Erwärmung dann

nicht zu hoch wird. Demnach brauchen nicht $9,1 \Omega$, sondern nur $19 \cdot 0,455 = 8,65 \Omega$ zwei Prozent vom Gesamtwidestande auszumachen; es muss also sein

$$8,65 = 0,02 (x + 9,1),$$

worin

$$x = 423,5 \Omega$$

der gesuchte Widerstand der Leitung ist. Der Querschnitt*) müsste hiernach

$$Q = \frac{2000}{423,5} \cdot 0,0175 = 0,0827 \text{ mm}^2$$

für Kupfer, oder $0,472 \text{ mm}^2$ für Eisen betragen, und der Effektverlust würde

$$\mathcal{E}_v = 11^2 \cdot 423,5 = 51\,250 \text{ Watt}$$

gegenüber einem Nutzeffekte

$$\mathcal{E}_n = 11^2 \cdot 0,455 \cdot 20 = 1100 \text{ Watt},$$

und der Wirkungsgrad der Leitung wäre

$$\gamma = \frac{\mathcal{E}_n}{\mathcal{E}_v + \mathcal{E}_n} = 0,0215.$$

Die Rechnung führt also in mehr als einer Beziehung zu Unmöglichkeiten. Der Querschnitt ist sowohl mit Rücksicht auf mechanische Festigkeit als auf Erwärmung viel zu dünn. Diesem Mangel kann man zwar leicht abhelfen, indem man einen genügend starken Querschnitt — nach Erwärmung berechnet — wählt und den an den verlangten $423,5 \Omega$ fehlenden Widerstand in Form einer besonderen Vorschaltung in die Leitung legt. Damit ist aber der Wirkungsgrad nicht gebessert, und der ist so gering, dass eine derartige Anlage unmöglich wirtschaftlich arbeiten kann.

Es geht hieraus hervor, dass eine Anlage unter den verlangten Bedingungen nicht ausführbar ist. Man verzichtet deshalb in der Praxis auf eine vollkommene Elastizität einer solchen Anlage, indem man entweder die Möglichkeit einzelne Lampen auszuschalten ausschliesst und sich damit begnügt, alle Lampen oder keine zu brennen, oder man reguliert — bei weniger empfindlichen Stromempfängern — mit besonderen Apparaten im Maschinenhause auf konstanten Strom.

Der erste Fall kommt am meisten in der Gestalt von paarweise hintereinander geschalteten Bogenlampen vor. Glühlichtanlagen mit Hintereinanderschaltung werden dagegen sehr selten

*) Den Gepflogenheiten der Praxis entsprechend wird in allen Beispielen, abweichend vom absoluten Masssystem, die Länge in m, der Querschnitt in mm^2 gemessen. Der diesem Masssystem entsprechende spezifische Widerstand ergibt sich in Ohm, wenn man die Mikrohms der bedeutenden Zahlen in der Tabelle des § 11 mit 100 multipliziert.

ausgeführt. Der freiwillige Verzicht auf die Möglichkeit, einzelne Lampen einer solchen Anlage aus- oder einschalten zu können, nützt hier nichts, da man mit unbeabsichtigter Ausschaltung, mit dem Durchbrennen einzelner Lampen, rechnen muss. Die Lampen müssen deshalb auch so konstruiert werden, dass beim Durchbrennen eines Kohlenfadens der Stromkreis nicht unterbrochen wird, und die Elastizität der Anlage muss so gross sein, dass ein gewisser Prozentsatz aller Lampen, der aus der Erfahrung abzuleiten ist, durchbrennen kann.

Der zweite Fall, dass in dem Maschinenhause auf konstanten Strom reguliert wird, kommt am meisten bei Anlagen für reine Bogenlichtbeleuchtung vor, bei denen eine grössere Anzahl von Bogenlampen hintereinander geschaltet ist; solche Anlagen sind in Deutschland selten, in Amerika dagegen sehr viel gebaut worden. Auch die Hintereinanderschaltung von Motoren für grössere Kraftübertragungsanlagen ist in dieser Weise in einigen Fällen ausgeführt worden.

28. Rückblick. Die Untersuchungen haben gezeigt, dass die Bedingungen, denen wir nach den bisher angestellten Betrachtungen die Leitungen unterwerfen können, nämlich die durch Rücksicht auf die Erwärmung, auf die Wirtschaftlichkeit und auf die Elastizität der Anlage gestellten Bedingungen unabhängig von einander sind und oft zu einander widersprechenden Ergebnissen führen.

Im allgemeinen ist die Regel aufzustellen, dass eine Leitung nach allen drei Bedingungen berechnet werden soll. Welche davon zuerst anzustellen und welcher am meisten Gewicht beizulegen ist, hängt von dem besonderen Charakter der Anlage ab.

Es kann auch ausser durch die Forderung genügender Elastizität der Anlage durch gewisse äussere Verhältnisse, wie z. B. bei Leitungen für Bogenlampen, der Spannungsverlust der Leitung vorgeschrieben sein, dann wird man sich, wie überhaupt in den meisten Fällen, mit der Berechnung auf Erwärmung und Spannungsverlust begnügen können.

II. Die Nebeneinanderschaltung (Parallelschaltung) von Widerständen.

29. Der zweite der beiden oben in § 20 erwähnten Einflüsse der Leitungen auf das Funktionieren der Stromempfänger machte sich im Experiment bemerkbar, wenn Glühlampen parallel geschaltet waren; waren beide Lampen nebeneinander eingeschaltet, so brannte jede der beiden dunkler als eine allein eingeschaltete. Das Schema