Die elektrischen Gleichstromleitungen mit Rücksicht auf ihre Elastizität

Teichmüller, Joachim

Stuttgart, 1898

I. Die Wärmeentwicklung als Ursache gefahrbringender Erwärmung

Der Einfluss des Stromes auf die Leitungen.

I. Die Wärmeentwicklung als Ursache gefahrbringender Erwärmung.

Darstellung der Temperaturerhöhung einer Leitung als Funktion des Stromes und ihrer physikalischen und geometrischen Grössen.

6. Erwärmung eines Körpers findet statt, wenn ihm Wärme zugeführt oder in ihm entwickelt wird, ohne dass diese Wärme sofort wieder abgeführt würde. Ist die Wärmezufuhr grösser als die Abfuhr, so erwärmt sich der Körper, überwiegt umgekehrt die Abfuhr gegenüber der Zufuhr, so kühlt er sich ab. Sind beide Werte einander gleich, ist also ein stationärer Zustand eingetreten, so hat der Körper eine bestimmte Temperatur angenommen. Die Erwärmung eines Körpers, d. h. die Erhöhung seiner Temperatur gegenüber seiner früheren oder der Temperatur seiner Umgebung, hängt also von dem Verhältnis der Wärmezufuhr zur Wärmeabfuhr ab; so sind auch bei den Leitungen die beiden Faktoren der Erwärmung zu betrachten, wenn die Frage beantwortet werden soll, welche Temperaturerhöhung stattfindet, wenn ein elektrischer Strom einen Leiter durchfliesst. Wir nehmen bei der Untersuchung dieser Frage an, dass sich die Leitung, sie selbst und ihre Umgebung, ihrer ganzen Länge nach in demselben Zustande befinde.

7. Die Wärmezufuhr. Das Aequivalent der Wärmezufuhr in elektrischer Arbeit wurde schon oben in der Grösse J^2RT angegeben; es ist nur noch nötig, diese elektrische Arbeit in Wärmeeinheiten, also in Grammcalorien, auszudrücken.

Wird die Stromstärke in Amp, der Widerstand in Ohm, die Zeit in Sekunden gemessen und angenommen, dass alle diese Grössen gleich Eins seien, so ergiebt das Produkt $J^2 R \cdot T = 1$

die elektrische Arbeitseinheit ein Joule. Diese praktische Einheit steht zur absoluten *CGS*-Einheit, dem Erg, in der Beziehung

$$1 \text{ Joule} = 10^7 \text{ Erg.}$$

Durch die Arbeiten von Robert Mayer, Joule und anderen ist bekannt, dass eine Grammcalorie einer Arbeit von 425 Grammmeter äquivalent ist, dass also

$$1 \text{ g cal} = 425 \text{ g m}$$

oder, da

$$1 \text{ g} = 981 \text{ Dyn und } 1 \text{ m} = 100 \text{ cm}$$

$$1 \text{ g cal} = 425 \cdot 981 \cdot 100 = 4{,}169 \cdot 10^7 \text{ Erg;}$$

also ist

$$1 \text{ g cal} = 4{,}169 \text{ Joule}$$

oder

$$1 \text{ Joule} = 0{,}24 \text{ g cal;} \quad \text{(4}$$

und der Strom J Amp erzeugt im Widerstande von R Ohm in T Sekunden die Wärmemenge

$$\mathfrak{W}_e = 0{,}24\ J^2RT \text{ g cal.} \quad \text{(5}$$

8. Die Wärmeabgabe. Während sich die Grösse der zugeführten Wärmemenge sehr leicht berechnen lässt, ist es schwer, die Grösse der Wärmeabgabe genau zu bestimmen, weil hierbei sehr viele Einflüsse mitwirken, die zu sehr dem Wechsel unterworfen sind und von Zufälligkeiten abhängen, als dass sie sich in mathematische Formeln kleiden liessen. Die Wärme wird von einem erwärmten Körper abgeführt durch Strahlung, Leitung und Konvektion. Die Wärmestrahlung geht nach denselben Gesetzen wie die Lichtstrahlung vor sich und hängt wesentlich von der Beschaffenheit der Oberfläche des Körpers ab. Bei der Wärmeleitung wird die Wärme von einem Teilchen auf ein unmittelbar benachbartes übertragen, es wird also nach und nach die ganze Umgebung des erwärmten Körpers bis zu einer gewissen Entfernung durch Leitung erwärmt werden, und zwar um so mehr und auf um so grössere Entfernungen, ein je besserer Wärmeleiter den Körper umgiebt. Durch Konvektion wird einem Körper Wärme entzogen, der sich in gasiger oder flüssiger Umgebung befindet, indem die durch die Bewegung des Gases oder der Flüssigkeit erwärmten Teilchen aus der Nähe des Körpers entfernt werden. Die Menge der durch Konvektion abgeführten Wärme wird hiernach wesentlich davon abhängen, ob die einen Leiter umgebende Luft sich in lebhafter oder mässiger Bewegung befindet.

Da vorausgesetzt wurde, dass der Leiter und seine Umgebung sich der ganzen Länge des Leiters nach in demselben Zustande befinden, so kann angenommen werden, dass von jedem Quadratcentimeter der Oberfläche des Leitungsdrahtes in einer bestimmten Zeit dieselbe Wärmemenge abgegeben wird; die Wärmeabgabe ist also proportional der Leiteroberfläche. Versuche rechtfertigen ferner die Annahme, dass die Wärmeabfuhr ausserdem (mit grosser Annäherung) der Differenz zwischen der Temperatur des Leiters und der der Umgebung proportional sei. Die Abhängigkeit der Wärmeabgabe von der Beschaffenheit der Oberfläche, der Umgebung und der Luftbewegung soll vorläufig nicht beachtet werden, es werde vielmehr irgend ein bestimmter Zustand in dieser dreifachen Beziehung angenommen. Von einem Quadratcentimeter eines in diesem Zustande befindlichen Leiters werde bei einer Temperaturdifferenz von einem Grad zwischen Leiter und Umgebung in einer Sekunde eine Wärmemenge A abgegeben, eine Grösse, die man den Koefficienten der Wärmeabgabe nennen kann, dann beträgt die vom ganzen Leiter bei einer Temperatur t_2 des Leiters und einer Temperatur t_1 der Umgebung in T Sekunden abgegebene Wärmemenge

$$\mathfrak{W}_a = A \cdot LU\,(t_2 - t_1)\,T, \cdots\cdots\cdots\cdots \quad (6$$

worin L die Länge, U den Umfang des Leiters bedeutet; und es ist hiermit ein Ausdruck für die Grösse der Wärmemenge gewonnen.

9. Die Erwärmung. Sobald ein stationärer Zustand erreicht ist, ist die Wärmezufuhr gleich der Wärmeabgabe, es sind also dann die unter Gleichung (5) und (6) angegebenen Werte einander gleich, nämlich

$$A \cdot LU(t_2 - t_1)\,T = 0{,}24\,J^2 \frac{L}{Q}\,\varrho\,T.$$

Die Zeit T und die Länge L fallen aus der Betrachtung heraus, was von vornherein hätte ausgesagt werden können, und es ergiebt sich für die Temperaturerhöhung

$$\tau = 0{,}24 \frac{\varrho}{A}\,\frac{J^2}{U \cdot Q}, \cdots\cdots\cdots\cdots \quad (7$$

oder für den wichtigsten Fall der kreisrunden Querschnitte, bei denen $U = D\pi$ und $Q = \frac{D^2\pi}{4}$

$$\tau = 0{,}0973 \frac{\varrho}{A}\,\frac{J^2}{D^3} \cdots\cdots\cdots\cdots \quad (8$$

Bezeichnen wir mit Stromdichte j die Stromstärke, die durch die Querschnittseinheit des Leiters fliesst, und führen wir diesen Wert

$$j = \frac{J}{Q}$$

in die Gleichungen (7) und (8) ein, so ergeben sich für die Temperaturerhöhungen die Werte

$$\tau = 0{,}24 \, \frac{\varrho}{A} \, j^2 \, \frac{Q}{U} \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \quad (9$$

oder

$$\tau = 0{,}06 \, \frac{\varrho}{A} \, j^2 \, D \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \quad (10$$

Aus diesen Gleichungen ergeben sich, wenn man gewisse Werte konstant hält, eine Reihe von Beziehungen, von denen die wichtigsten besonders aufgeführt werden sollen:

Es sei	und ausserdem	so ist
I. $J =$ const.	$D =$ const.	1. $\tau =$ Const. ϱ
	$\varrho =$ const.	2. $\tau =$ Const. $\frac{1}{D^3}$
II. $D =$ const.	$\varrho =$ const.	3. $\tau =$ Const. J^2
III. $\tau =$ const.	$\varrho =$ const.	4. $J =$ Const. $\sqrt{D^3}$ oder $D =$ Const. $\sqrt[3]{J^2}$
		5. $j =$ Const. $\frac{1}{\sqrt{D}}$
	$\varrho =$ const. $Q =$ const.	6. $J =$ Const. $\sqrt{U}$
		7. $j =$ Const. $\sqrt{U}$
	$D =$ const.	8. $J =$ Const. $\frac{1}{\sqrt{\varrho}}$
		9. $j =$ Const. $\frac{1}{\sqrt{\varrho}}$
	$J =$ const.	10. $D =$ Const. $\sqrt[3]{\varrho}$

Bei allen Formeln mit Ausnahme von Nr. 6 und Nr. 7 ist angenommen, dass der Querschnitt kreisförmig sei. Einige der wichtigsten unter diesen Formeln sollen in Worten ausgedrückt werden:

1. Werden Leitungsdrähte von gleichem Durchmesser, die auf gleiche Weise isoliert, von gleicher Oberflächenbeschaffenheit und unter gleichen äusseren Umständen verlegt sind, aber aus verschiedenem Material (ϱ) bestehen, von demselben Strome durchflossen, so ist die Temperaturerhöhung der Drähte proportional ihrem spezifischen Widerstande.

3. Wird ein Leitungsdraht von bestimmtem Material, der seiner ganzen Länge nach von demselben Durchmesser, auf gleiche Weise isoliert, von gleicher Oberflächenbeschaffenheit und unter gleichen äusseren Umständen verlegt ist, von verschiedenen Strömen durchflossen, so ist die Temperaturerhöhung proportional dem Quadrate der Stromstärke.

4. und 5. Wird zur Bedingung gemacht, dass bei Leitungsdrähten, die von demselben Material, auf dieselbe Weise isoliert, von der gleichen Oberflächenbeschaffenheit und unter denselben äusseren Umständen verlegt, aber von verschiedenem Durchmesser sind, die Temperaturerhöhung dieselbe sei, so muss die Stromstärke der $\frac{3}{2}$-ten Potenz des Durchmessers proportional sein, die Stromdichte dagegen muss abnehmen mit der Quadratwurzel aus dem Durchmesser.

Der zweite dieser drei Sätze, der übrigens wie der erste schon aus dem Jouleschen Gesetze hätte gefolgert werden dürfen, mahnt zu grosser Vorsicht. Wäre z. B. ein Draht von einem solchen Strome durchflossen, dass die Temperaturerhöhung noch eben in den zulässigen Grenzen bliebe, so würde eine Ueberschreitung dieses Stromes um 10 % die Temperaturerhöhung um über 20 % zunehmen lassen, und der Draht würde leicht so stark erwärmt werden, dass er der Umgebung gefährlich werden könnte.

Der Maximalwert des für eine Leitung zulässigen Stromes.

10. Die wichtigste Frage, welche Stromstärke für einen bestimmten Durchmesser noch zulässig ist, beantwortet der zuletzt ausgesprochene Satz der Formel Nr. 4. Praktische Verwendung kann diese Formel selbstverständlich erst finden, wenn der Wert des konstanten Faktors in einer Zahlengrösse angegeben ist. Die Konstante enthält aber — vergl. Gleichung (8) auf Seite 9 — die Grössen ϱ, τ und A und den Zahlenfaktor 0,0973. Wir müssen demnach alle diese Grössen für sich betrachten, um den Wert des konstanten Faktors in der Formel

$$J = \text{Const.}\ D^{3/2}$$

zu gewinnen.

II. Wert und Bedeutung der einzelnen Grössen der Gleichung 8. Der spezifische Widerstand ϱ. Der Faktor ϱ war oben definiert als der Widerstand eines Leiters von der Längeneinheit und der Querschnittseinheit, und er war der spezifische Widerstand genannt worden. Diese Definition genügt aber noch nicht, denn die Beobachtung lehrt, dass der Widerstand eines Leiters noch von anderen Einflüssen abhängig ist, ganz besonders auch von der Temperatur; zur Angabe des spezifischen Widerstandes bedarf es deshalb noch der Festsetzung einer bestimmten Temperatur, die für alle Angaben ohne besondere Erwähnung gültig sein sollte. Leider ist eine vollkommene Einigung über diese Temperatur noch nicht erzielt worden; während die Wissenschaft den Angaben gewöhnlich die Temperatur 0° zu Grunde legt, pflegt die Technik 15° anzunehmen, und es ist deshalb nötig bei der Angabe des spezifischen Widerstandes die Temperatur, bei der seine Messung gedacht ist, mit anzugeben.

Wenn das Gesetz der Abhängigkeit des Widerstandes von der Temperatur bekannt ist, kann man durch Rechnung die eine Angabe aus der andern ableiten. Dieses Gesetz ist experimentell bestimmt worden und lässt sich mit grosser Annäherung durch die Gleichung

$$R_T = R_0 \, (1 + \alpha_1 \, T)$$

oder

$$R_T = R_{15} \, (1 + \alpha_2 \, [T - 15]) \quad \ldots\ldots\ldots (11$$

ausdrücken, worin R_T den Widerstand bei der Temperatur T^0, R_0 bei der Temperatur 0°, R_{15} bei 15° bedeuten. Die Grössen α stellen den Widerstand dar, um den die Widerstandseinheit bei dem Temperaturzuwachs von 1° wächst, und zwar α_1 oder α_2 je nachdem der betreffende Widerstand bei 0° oder bei 15° den Wert 1 hatte. Die beiden α sind nicht einander gleich, denn aus der Gleichung (11a) ergiebt sich

$$R_{15} = R_o \, (1 + \alpha_1 \, 15)$$

also

$$R_T = R_{15} \left(\frac{1 + \alpha_1 \, T}{1 + \alpha_1 \, 15} \right)$$

Ist aber α_1 eine sehr kleine Grösse, so dass $\alpha_1 \, T$ und $\alpha_1 \, 15$ klein gegen 1 sind, so lässt sich für R_T schreiben

$$R_T = R_{15} \, (1 + \alpha_1 \, [T - 15])$$

Unter dieser Voraussetzung ist also $\alpha_1 = \alpha_2$, und man kann denselben Wert α benützen, gleichgültig von welcher Temperatur man ausgeht. Diese Grösse α heisst der Temperaturkoefficient des Widerstandsmaterials. Zur genauen Definition des Temperaturkoefficienten gehört aber die Angabe einer bestimmten Temperatur, die man um 1^0 erhöht, und wir wollen, den Gepflogenheiten der Technik entsprechend, diese Temperatur auf 15^0 festsetzen und darnach den Temperaturkoefficienten definieren als den Widerstandszuwachs, den die bei 15^0 gemessene Widerstandseinheit erfährt, wenn die Temperatur um 1^0 zunimmt.

Ausser der Temperatur ist der Härtegrad des Metalles von Einfluss auf den Widerstand, und es muss bei der Angabe des spezifischen Widerstandes der Härtegrad mit angegeben werden. Wo dies nicht geschieht, ist anzunehmen, dass sich das Metall in möglichst weichem Zustande befinde; bei vielen Metallen ist man deshalb berechtigt eine Bezeichnung dieses Zustandes zu unterlassen, weil die geringste Verunreinigung des Metalles oder sehr kleine Abweichungen in der Zusammensetzung der Metalllegierungen einen grössern Einfluss auf den spezifischen Widerstand ausüben als der Härtegrad. Selbstverständlich bemüht man sich bei der wissenschaftlichen Festsetzung des spezifischen Widerstandes die Metalle absolut rein zu erhalten. Da aber die verschiedenen Messungen oft erheblich verschiedene Werte ergeben haben, nachdem im besondern die neueren Beobachtungen für das Kupfer fast immer kleinere Werte für den spezifischen Widerstand ergeben haben als die vorangegangenen, ist man berechtigt anzunehmen, dass die älteren für chemisch rein gehaltenen Metalle noch fremde Beimengungen enthalten haben, und man darf zweifeln, ob die letzten Beobachtungen schon die günstigsten Werte ergeben haben. Für die Technik sind aber diese Angaben so lange von geringer Bedeutung, als es nicht gelingt, die Leitungsmetalle auf billigem Wege im Grossen rein herzustellen, wir haben uns hier vielmehr an die Werte zu halten, die für die Metalle der nach der üblichen Weise hergestellten Leitungsdrähte gelten.

Der spezifische Widerstand und der Temperaturkoefficient der wichtigsten Metalle und Legierungen ist in der folgenden Tabelle angegeben, und zwar im allgemeinen bei 15^0; nur bei Metallen, bei denen die Kenntnis des spezifischen Widerstandes auch hervorragendes wissenschaftliches Interesse besitzt, ist die Angabe auch für die Temperatur von 0^0 gemacht. Die Zahlen geben den Widerstand eines Stückes von 1 cm Länge und 1 cm^2 Querschnitt in Mikrohm an. Man nennt diese Einheit auch, um anzudeuten, welche Längen- und Querschnittseinheiten zu Grunde gelegt sind, das Mikrohm-Centimeter.

Tabelle der spezifischen Widerstände in Mikrohm-cm und der Temperaturkoefficienten.

		spez. Widerstand bei 0°	spez. Widerstand bei 15°	Temperaturkoefficient.
1.	Silber	1,50	1,586	0,0038
2.	Kupfer, rein	1,534	1,636	0,00445
	Leitungskupfer	—	1,75	0,004
3.	Gold	2,06	2,16	0,00365
4.	Messing	—	7 bis 8.	0,0015
5.	Eisen	—	10 bis 13	0,0048
6.	Stahl	—	10 bis 25	0,0052
7.	Neusilber	—	30 bis 40	0,0002 bis 0,0004
8.	Manganin	—	42 bis 43	0,00002
9.	Nickelin	—	40 bis 45	0,00018bis0,0002
10.	Konstantan	—	48 bis 50	— 0,00003
11.	Kruppin	—	85	0,00008
12.	Quecksilber	94,073	—	0,000907
13.	Kohle	—	10^4 bis 10^5	— 0,0003 bis — 0,0008

Die spezifischen Widerstände der aufgeführten Metalllegierungen schwanken mehr oder weniger stark, je nach ihrer procentualen Zusammensetzung; die Zusammensetzung ist ungefähr folgende:

Neusilber: 60 Cu, 14 bis 21 Ni, 26 bis 19 Zn,
Nickelin: 56 Cu, 24 Ni, 20 Zn,
Manganin: 84 Cu, 4 Ni, 12 Mn,
Konstantan: 58 Cu, 41 Ni, 1 Mn.

Unter den Zahlen sind Gewichtsteile zu verstehen.

Die Temperaturerhöhung τ. Das Wesentliche bei der Betrachtung der Leitungen in Bezug auf ihre Erwärmung ist natürlich nicht die Temperaturerhöhung, sondern vielmehr die Temperatur des erwärmten Leiters, und es gilt, für diese eine Grenze festzusetzen. Diese Grenze wird sich einerseits nach dem Verhalten zu richten haben, das die Leitungs- und Isoliermaterialien und die in der unmittelbaren Umgebung der Leitung befindlichen Stoffe höheren Temperaturen gegenüber zeigen, andrerseits nach der Aufgabe, die die Leitung zu erfüllen hat. In der Praxis hat es sich als zweckmässig herausgestellt, bei der Bestimmung der zulässigen Temperatur Unterschiede im Leitungs- und Isoliermaterial nicht zu machen und auch die mögliche Verschiedenheit der Umgebung ausser acht zu lassen, und zwar deshalb, weil die Unterschiede der Materialien in ihrem Verhalten gegenüber höheren Temperaturen nicht bedeutend sind, und weil von der Art der Umgebung bei einer bestimmten Anlage selten etwas für alle Zeit Bindendes ausgesagt werden kann. Derselbe Raum, der heute eine verhältnismässig hohe Temperatur ohne Nachteil wird ertragen können, kann morgen mit Stoffen angefüllt sein, die sehr empfindlich gegen hohe Wärmegrade sind. Bei der Festsetzung der höchsten zulässigen Temperatur handelt es sich aber um nichts Geringeres als um die Ausschliessung jeder Feuersgefahr, und es ist deshalb grosse Vorsicht geboten. Diesem Gebote werden wir dadurch gerecht, dass wir eine Temperatur als Grenze festsetzen, die auch noch dem empfindlichsten der in Frage kommenden Stoffe unschädlich sein würde.

Bei den Leitungen, die die Aufgabe haben, den elektrischen Strom von der Erzeugungsstelle zur Verbrauchsstelle fortzuleiten, den Leitungen im engeren Sinne, ist der empfindlichste Stoff das zur Isolation benutzte Material, besonders die zur Tränkung der Faserumspinnung gebräuchlichen organischen Körper. Der Schmelzpunkt einiger dieser Stoffe und Gemische liegt in der Gegend von 60^0. Würde man diese Temperatur als Grenze einsetzen und als normale Temperatur der Umgebung 20^0, die Zimmertemperatur, annehmen, so würde sich als zulässige Temperaturerhöhung eine Erhöhung um 40^0 ergeben. Bei dieser Festsetzung würden wir also gestatten, dass sich die Leitungen so stark erwärmen, dass die empfindlichsten Tränkungsstoffe eben zu schmelzen beginnen. Das darf aber unter gewöhnlichen Verhältnissen nicht zugelassen werden, wenn auch die Leitung dabei noch nicht so stark erwärmt wird, dass sie dauernden Nachteil erlitten hätte; wir müssen vielmehr die Grenze noch tiefer setzen.

Der Gedankengang, der nun zur allgemeinen Annahme einer bestimmten Temperaturerhöhung als oberster Grenze für Leitungen im engeren Sinne geführt hat, ist der: Es darf nicht die Stromstärke zugelassen werden, die die Leitung bis zur äussersten Grenze der im Notfalle zulässigen Temperatur erwärmt, es muss vielmehr für den Strom ein hinreichend grosser Spielraum gelassen werden, und zwar soll die zuzulassende Stromstärke die Hälfte der Stromstärke betragen, die die Erwärmung auf die äusserste Grenze treiben würde. Da die Temperaturerhöhung aber nach Formel Nr. 3 der auf Seite 10 gegebenen Tabelle dem Quadrate der Stromstärke proportional ist, so dürfen an Stelle der 40^0 nur 10^0 Erhöhung zugelassen werden. Diese Zahl $\tau = 10$ ist allgemein angenommen, im Interesse der Einheitlichkeit auch für Leitungen, die im Freien verlegt sind, obwohl bei diesen wegen ihrer Verlegungsart eine etwas grössere Temperaturerhöhung zugelassen werden dürfte.

Sieht man von den Leitungen im engeren Sinne ab, so sind noch

1) die Leitungen in den Stromerzeugern,
2) die Leitungen in den Stromempfängern,
3) die Widerstandsleitungen

zu betrachten. Für die Leitungen der ersten Art, z. B. die Bewicklungen einer Dynamomaschine gelten die angestellten Ueberlegungen nicht mehr, denn in einer Maschine ist die dem Ausdrucke J^2RT entsprechende Wärmemenge, die sogen. Stromwärme, nur eine der Ursachen der Erwärmung, andrerseits sind die Leitungen in den Stromempfängern, zu denen die Glühlampen, Bogenlampen, Heizkörper u. a. zu zählen sind, so verschieden von den bisher betrachteten Leitungen, dass sie eine besondere Behandlung verdienen. Die Leitungen der ersten und zweiten Art sollen deshalb hier übergangen und nur noch ein kurzer Blick auf die Widerstandsleitungen geworfen werden.

Während es bei den eigentlichen Leitungen als Uebelstand aufgefasst werden musste, dass in ihnen elektrische Energie als solche verloren geht, ist es gerade die Aufgabe der Widerstandsleitungen elektrische Energie zu vernichten, und zwar soll im allgemeinen in einem Widerstandsapparate, oder nach der üblichen Benennung: einem Widerstande, von gegebener Grösse eine möglichst grosse Menge von elektrischer Energie vernichtet, d. h. in Wärme umgesetzt werden, seine Leistung*) soll möglichst gross sein. Dies treibt zu einer Erhöhung der Temperaturgrenze, und man kann hierzu unbedenklich schreiten, wenn man nur die Widerstände so konstruiert, dass ihre hohe Temperatur weder ihnen selbst noch der Umgebung schaden kann, und damit ein Verfahren einschlägt, das bei den Leitungen im engeren Sinne unmöglich ist.

Zu diesem Zwecke wird zur Herstellung der Widerstände nur Metall und unverbrennbares Isoliermaterial verwendet, wie Porzellan, Schiefer, Marmor, Asbest oder dergl., und die Grenze der zulässigen Temperatur wird dann nicht mehr durch das Verhalten des Isoliermaterials, sondern durch das Verhalten des Leitungs-

*) Das Wort Kapazität, das zur Bezeichnung der Leistung eines Widerstandes viel gebraucht wird, wird in der Elektrotechnik in so vielerlei Sinne angewendet, dass es sich empfiehlt, es überall da zu unterdrücken, wo ein anderes Wort ebenso sehr oder, wie in diesem Falle, besser am Platze ist.

drahtes selbst den hohen Temperaturen gegenüber gezogen; und zwar ist es hier wesentlich die Ausdehnung des Drahtes durch die Erwärmung, die die Temperatur bestimmt, denn diese ist zuerst im stande eine dauernde Veränderung des Widerstandes nach sich zu ziehen. Als Temperaturgrenze dürfen für Widerstände etwa 100° angenommen werden; noch höher darf man die Erwärmung kommen lassen bei Widerständen, die nicht im normalen Betriebe, sondern bei Versuchen verwendet werden sollen, denn in diesem Falle stehen die Widerstände unter steter Beobachtung.

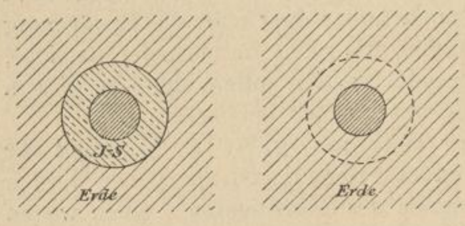
Der Koefficient der Wärmeabgabe A. Während der spezifische Widerstand ϱ mit grosser Genauigkeit angegeben werden konnte, muss man bei der Angabe des Koeffizienten A einen weiten Spielraum lassen, denn die Wärmeabgabe ist von zu vielen Umständen und Einflüssen abhängig, die sich nicht genau verfolgen und präzisieren lassen, und für die sich nicht einmal ein Mass angeben liesse. Wie schon oben in § 8 erwähnt wurde, hängt die von 1 cm² der Oberfläche des Leiters abgegebene Wärmemenge A ab

1) von der Beschaffenheit der Leiteroberfläche,
2) von der Art und Stärke der Isolation,
3) von dem Zustande der Umgebung, insbesondere dem Grade der Luftbewegung.

Die Beschaffenheit der Oberfläche ist von grossem Einfluss: Es wird mehr Wärme in derselben Zeit von einer rauhen Oberfläche abgegeben als von einer glatten, mehr von einer geschwärzten als von einer blanken, und zwar kann die Wärmeabgabe von einer geschwärzten, rauhen Oberfläche leicht das Doppelte betragen von der von einer glatten, blanken Oberfläche abgegebenen Wärmemenge. Dieser Unterschied wird sich zwar in der Praxis hauptsächlich deshalb nicht sehr fühlbar machen, weil blanke Drähte nicht lange in diesem Zustande zu bleiben pflegen, vielmehr bald durch Oxydation und Ansetzen von Staub und Schmutz eine rauhe und dunkle Oberfläche erhalten. Die erwähnte Thatsache aber mahnt bei blanken Leitungen zur Vorsicht, und es empfiehlt sich unter Umständen, den blanken Drähten einer neuen Anlage, von denen man weiss, dass sie eine verhältnismässig hohe Stromstärke zu leiten haben, oder den Drähten eines Widerstandsapparates durch einen passenden Anstrich eine rauhe und schwarze Oberfläche zu verleihen.

In betreff des Einflusses, den die Isolation auf die Wärmeabgabe und Erwärmung einer Leitung ausübt, ist vielfach die falsche Meinung verbreitet, dass sich eine ihrer ganzen Länge nach gleichmässig isolierte Leitung, die also aus isolierten Drähten hergestellt ist, mehr erwärme als eine andere aus nackten Drähten hergestellte Leitung. Das ist nicht der Fall. Denken wir uns z. B. ein unterirdisch verlegtes Leitungskabel (vergl. Fig. 3a), bei dem also die Konvektion keine Rolle spielt, das von einer starken Isolationsschicht *J-S* umgeben sei, und ein zweites Kabel (Fig. 3b), das von gleichem Leiterquerschnitt und vom gleichen Strome durchflossen ist, dessen aus gleichem Material bestehende Isolationsschicht aber ganz dünn, nur eben so stark ist, dass der Leiter von dem umgebenden Erdboden vollständig isoliert ist. Von dem ersten Kabel wird, wenn wir von dem Einflusse der Oberfläche der Isolationshülle absehen, eine grössere oder kleinere Wärmemenge in derselben Zeit abgegeben werden als von dem zweiten Kabel, je nachdem das spezifische Wärmeleitungsvermögen des Isolationsmaterials im ersten Falle grösser oder kleiner ist als das des Erdbodens im zweiten Falle; denn den cylindrischen Raum, den dort die Isolationshülle einnimmt, nimmt hier ein genau gleicher Cylinder ein, den man sich aus dem Erdboden herausgeschnitten denken kann und dessen Querschnitt in der Figur durch den punktierten Kreis abgegrenzt ist*).

Fig. 3a und 3b.



In ähnlicher Weise wird auch bei oberirdisch verlegten Leitungen das Material der nächsten Umgebung einen Einfluss auf die Wärmeabgabe ausüben, doch tritt dieser hier gegenüber dem Einflusse, den die Luftbewegung ausübt, zurück. Die Luftbewegung ist verschieden, je nachdem die Leitungen im Freien oder in geschlossenen Räumen oder unterirdisch verlegt sind. Im Freien ist die Wärmenabgabe durch Konvektion auch bei ruhiger Luft wesentlich höher als in geschlossenen Räumen; sie steigt leicht auf das Drei- und Vierfache und darüber. Bei unterirdischer Verlegung ist die Konvektion offenbar sehr klein, annähernd gleich Null.

Die Unsicherheit aller dieser Verhältnisse soll uns veranlassen, auf die Angabe von Zahlenwerten zu verzichten und uns damit zu begnügen, die Bedeutung dieses Wertes *A* und seine Abhängigkeit von den verschiedenen Umständen kennen gelernt zu haben. Wir

*) Eine ausführliche Darstellung dieser Thatsachen geben Herzog und Feldmann in ihrem Buche über die Berechnung elektrischer Leitungsnetze in Theorie und Praxis. Berlin und München 1893.

dürfen natürlich auf eine Angabe dieses Wertes und damit auf eine rechnerische Ermittlung der Konstanten in der Gleichung $J = C \cdot D^{3/2}$ nur dann verzichten, wenn uns ein anderer Weg zur Feststellung von C zu Gebote steht, und ein solcher bietet sich in der That sehr einfach in dem Experiment. Ist die Konstante C aber für ein bestimmtes Verhältnis ermittelt, so lassen sich die Bedingungen für andere Verhältnisse aus den Beziehungen, die in der auf Seite 10 abgedruckten Tabelle angegeben sind, ableiten.

12. Die experimentelle Ermittelung der Konstanten C. Die Bestimmung der Konstanten C in der Gleichung $J = C D^{3/2}$ durch den Versuch setzt natürlich die thatsächliche Gültigkeit der Formel voraus, die bisher nur theoretisch abgeleitet ist; es ist also zunächst der Nachweis der Gültigkeit zu führen. Ist das aber geschehen, so ist damit offenbar auch die Aufgabe der Konstanten-Bestimmung gleichzeitig erledigt.

Der Versuch ist in folgender Weise auszuführen: Es werden Leitungen derselben Art, die sich durch nichts als durch ihren Leiterdurchmesser von einander unterscheiden — so dass also $C = f(\varrho, \tau, A)$ nur noch von τ abhängig ist — in genau derselben Art und Umgebung verlegt, natürlich so, dass sie sich gegenseitig nicht beeinflussen können. Durch diese Leitungen wird Strom geschickt, der allmählich so weit gesteigert wird, bis die Temperatur der Drähte unter der dauernden Einwirkung dieses Stromes eine Erhöhung um ein bestimmtes, festgesetztes Mass, z. B. $\tau = 10^0$, erfahren hat. Die Stromstärken in den Leitungen ergeben dann ohne weiteres die Beziehung $J = f(D)$. Die Beobachtung der Temperaturzunahme geschieht hierbei nicht durch direkte Beobachtung der Temperatur, sondern durch Messung der Widerstandszunahme, aus der mit Hilfe des bekannten oder vorher zu ermittelnden Temperaturkoefficienten die Temperaturzunahme ermittelt werden kann, und zwar weit genauer als durch direkte Beobachtung.

Versuche dieser Art sind zuerst von Kennelly angestellt worden; sie haben ergeben, dass die Versuchskurve allerdings merklich von der nach der Theorie erwarteten Kurve abweicht, doch ist immerhin diese Abweichung nicht so gross, dass sie für die elektrotechnische Praxis von Bedeutung sein könnte.

II. Folgerungen für die Praxis.

13. Wahl des Leitungsmetalles und der Querschnittsform. Von den Leitungen im engeren Sinne, die künftig — wo nicht eine besondere Unterscheidung nötig ist — schlechtweg Leitungen genannt