Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke

Band: 42 (1951)

Heft: 5

Artikel: Über den Aufbau, die Regelwirkung und die Anwendung von Heissleitern

Autor: Meyer-Hartwig, E. / Federspiel, H.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-1060981

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 02.10.2025

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

natürlich nicht ständig ansteigen und man kommt damit zu einer periodischen Modulation nach Fig. 20. Auf den ersten Blick scheint diese Methode ideal zu sein. Bei näherem Hinsehen erkennt man aber verschiedene Nachteile: Der Frequenzhub muss für die Messung kleiner Distanzen ausserordentlich gross gemacht werden (Grössenordnung 20 MHz). Hierdurch entsteht eine starke, unerwünschte Amplitudenmodulation, die sehr störend wirkt. Ausserdem entsteht bei der Auszählung der Differenzfrequenz ein sehr merkwürdiger Fehler, der zwar genau berechnet werden kann, aber bei

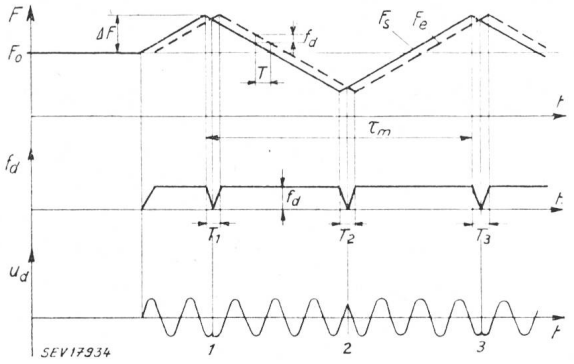

Fig. 20

Arbeitsprinzip eines Radarhöhenmessers mit Frequenzmodulation

F Frequenz
F_0 mittlere Sendefrequenz
f_d Differenzfrequenz zw. F_s und F_e, sog. Radarfrequenz
u_d Spannung der Frequenz f_d
ΔF Frequenzhub
F_s momentane Sendefrequenz
F_e momentane Empfangsfrequenz
t laufende Zeit
τ_m Periodendauer eines Modulationszyklus
$T = T_1, T_2, T_3$ Laufzeit des reflektierten Signals

der Messung kleiner Höhen doch sehr unangenehm bleibt. Er äussert sich darin, dass die Anzeige nicht kontinuierlich erfolgt, sondern gewissermassen stufenweise (Fig. 21) und ständig um einen gewissen festen Betrag springt. Dieser sog. feste Fehler ist umgekehrt proportional dem Frequenzhub und erreicht bei ausgeführten Geräten eine Grösse bis zu 10 m.

Unsere Arbeiten haben nun zu einem neuen System mit Frequenzmodulation geführt, das die meisten dem alten System anhaftenden Nachteile vermeidet und speziell für kleine Distanzen bedeutend

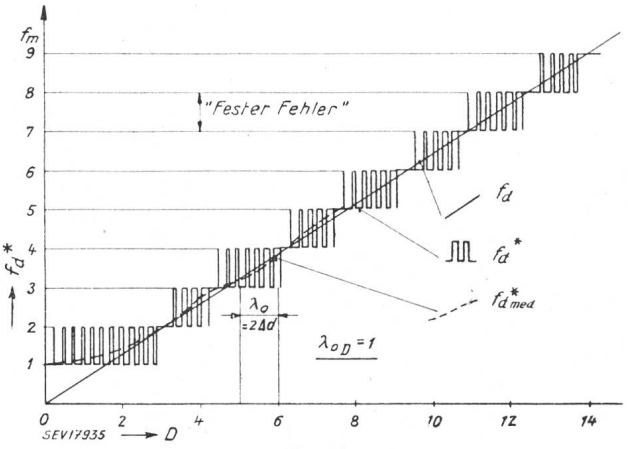

Fig. 21

Die Anzeige eines Radarhöhenmessers

f_d proportional der tatsächlichen Distanz
f_d^* angezeigter Wert bei kleiner Geschwindigkeit v
$f_{d\,med}^*$ mittlerer angezeigter Wert bei grösserer Geschwindigkeit
f_m Modulationsfrequenz des Senders
λ_0 Wellenlänge der Sendefrequenz
$\Delta d = \lambda_0/2$
λ_{0D} Wellenlänge der Sendefrequenz, bezogen auf die genormte Distanz D
D genormte Distanz $= 2\,\pi\Delta F \cdot T$ (vgl. Fig. 20)

bessere Resultate verspricht. Die Richtigkeit der Rechnungen wurde durch prinzipielle Versuche bestätigt, und es scheint, dass nach dem neuen System nicht nur Höhenmesser, sondern auch andere Radargeräte mit guter Genauigkeit und sehr kleinem Aufwand herstellbar sind [3]).

Adresse des Autors:
Dr. *Kurt Witmer*, Dipl. Ing., Universitätsstrasse 80, Zürich 6.

[3]) Eine eingehende Beschreibung des neuen Systems findet sich in der kürzlich erschienenen Mitteilung Nr. 13 aus dem Institut für Hochfrequenztechnik: «Studien über Radarsysteme mit Frequenzmodulation.»

Über den Aufbau, die Regelwirkung und die Anwendung von Heissleitern

Von *E. Meyer-Hartwig* und *H. Federspiel*, Terlano (Italien)

621.315.59

In dieser Arbeit wird über Heissleiter, sowie über ihre grundsätzliche Anwendung als Spannungs- und Stromregler zur Dämpfung des Einschaltstromstosses bzw. als Temperaturfühler für die verschiedensten Temperaturmessaufgaben berichtet. Auf die Auswahl der Werkstoffe wird eingegangen, insbesondere auf Oxydmischungen, auf Spinelle und auf die neuen Kapillarheissleitermassen. Die sintertechnische Erzeugungsweise wird gestreift, die Ausführungsformen werden gekennzeichnet, kleine Typen in Glaskolben mit und ohne indirekte Heizung und solche bis zu grossen Abmessungen und für grosse Stromstärken.

Für Heissleiter als Spannungsregler, als Schutzanlasser in Radiogeräten und als Anlasser für Geräte mit grossen Stromstärken werden Diagramme angegeben. An Ausführungsformen wird ein Motoranlasser, ein Überspannungsschutzgerät für Freileitungen und eine Brückenanordnung für Verzögerungsschaltungen beschrieben.

Les auteurs traitent des thermistors et de leurs principales applications comme régulateurs de tension, régulateurs de courant pour l'amortissement de la surintensité à la fermeture d'un circuit et sondes de température dans les domaines de mesure les plus divers. Ils examinent la question du choix des matières premières (mélanges d'oxydes, spinelles, semi-conducteurs capillaires), le mode de fabrication par agglomération et frittage, ainsi que les formes d'exécution des thermistors, qui vont des petits modèles dans des tubes de verre avec ou sans chauffage indirect, jusqu'aux grands modèles pour fortes intensités.

Des graphiques indiquent l'emploi des thermistors comme régulateurs de tension, résistances de démarrage sous fortes intensités et résistances de démarrage et de protection pour appareils radiorécepteurs. Pour terminer, les auteurs décrivent quelques applications, notamment un démarreur triphasé, un appareil de protection contre les surtensions dans les lignes aériennes et un montage en pont pour enclenchements retardés.

1. Einleitung

Regelwiderstände mit negativen Temperaturkoeffizienten nennt man Heissleiter. Diese gewinnen in den verschiedensten Fachrichtungen der Elektrotechnik mehr und mehr an Bedeutung. Es soll deshalb mit dieser Arbeit ein Überblick über die Bauformen, die verwendeten Werkstoffe und ihre Verarbeitung gegeben werden. Da mit den Heissleitern schwierige technische Probleme auf elegante Weise gelöst wurden und mit den schon bekannten Lösungen die Verwertung der Heissleiter kaum erschöpft sein dürfte, soll dieser Aufsatz dazu beitragen, neue Anwendungen anzuregen.

2. Begriffsbestimmungen

Regelwiderstände sind elektrische Widerstände, deren Widerstandsbetrag bei Temperaturänderung sich ebenfalls ändert. Regelwiderstände mit positivem Temperaturkoeffizienten nennt man Kaltleiter, da sie im kalten Zustand besser leiten, Regler mit negativen Temperaturkoeffizienten dagegen Heissleiter, da sie bei höheren Temperaturen besser leiten. Zu den erstgenannten Typen gehören die Eisenwasserstoff-Widerstände, und in neuerer Zeit auch keramische Widerstände, zu den zweiten Typen diejenigen, die hier beschrieben werden sollen.

Bei Heissleitern definiert man nach *H. Sachse* [1] [1]) als Kaltwiderstandswert den Betrag bei 20 °C. Der Temperaturkoeffizient α stellt in bekannter Weise die Widerstandsänderung für 1° Temperaturerhöhung nach der Beziehung

$$\alpha = \frac{1}{R} \cdot \frac{\mathrm{d}R}{\mathrm{d}T}$$

dar, worin R den Widerstandswert und T die absolute Temperatur bedeuten. Der Wert ist negativ und seinerseits temperaturabhängig. Der Temperaturkoeffizient α wird in Prozenten angegeben und üblicherweise auf 20 °C (in der angelsächsischen Literatur auf 25 °C [2] bezogen. Der Tiefstwert des Warmwiderstandes ist durch die aus physikalischen oder chemischen Gründen zulässige Temperatur festgelegt. Durch ihn ist ein Mass für den Leistungsverbrauch des Heissleiters gegeben. Er wird in Prozenten des Kaltwertes ausgedrückt. Das Verhältnis des Kaltwiderstandes zum Warmwiderstandswert wird Regelfaktor genannt.

3. Arbeitsweise und grundsätzliche Anwendungen

Die Einstellung des Widerstandswertes ist also von der Temperatur abhängig und kann durch Strombelastung, durch eine besondere Fremdaufheizung oder durch die Umgebungstemperatur erfolgen. Auch können die drei Temperaturänderungsarten kombiniert auftreten. Die Aufheizungsgeschwindigkeit wird bestimmt durch die Abmessungen des Widerstandes bzw. seine Form, die spezifische Wärme und sonstige Daten, die die Wärmeübergangsverhältnisse beeinflussen. Unter Umständen muss bei der Aufheizung durch Strombelastung eine gewisse Spannungsabhängigkeit des Stromtransportes in den Werkstoffen [3] berücksichtigt werden. Diese unübersichtlichen Faktoren, welche experimentell durch die Stromspannungskurve bzw. durch den Temperatur-Widerstandsverlauf erfasst werden, bestimmen die Bemessung und die entsprechenden Anwendungsmöglichkeiten der Heissleiter. Auf diese Charakteristiken werden wir später noch zurückkommen, doch interessieren zuvor die grundsätzliche Anwendungsweise und das Aussehen der Widerstände.

Die verschiedenen Heissleiterausführungen kann man entsprechend der vorzugsweise verwendeten Art der Aufheizung klassifizieren. Technisch am wichtigsten ist die Aufheizung durch den den Heissleiter durchfliessenden Strom. Man kann unterscheiden:

a) Spannungsregler mit grosser Oberfläche, bei denen die dem Regler zugeführte Joulsche Wärme möglichst schnell weggeführt werden muss, wobei die Abfuhr vorzugsweise durch Abstrahlung erfolgt (Strahlungsinduktive Spannungsregelung),

b) Stromregler bei denen die Aufheizung des Heissleiters den Einschaltstromstoss dämpft (Wärmekapazitive Stromregelung)

und schliesslich für Heissleiter ohne elektrische Aufheizung:

c) Temperaturfühler, bei welchen die Temperaturänderungen der Umgebung zu Widerstandsänderungen führen.

Fig. 1 zeigt einige Bauformen für die verschiedenen Anwendungen. Die abgebildeten Spannungsregler haben kleine und kleinste Abmessungen und

Fig. 1
Heissleiter verschiedener Typen von kleinsten bis zu grossen Abmessungen

sind wenig fest; sie sind deshalb oder auch aus Gründen der Korrosions- und der Wärmeabfuhrverhältnisse in ein Schutzrohr eingebaut. Die grösseren Bauformen sind bei den modernen Heissleitern genügend korrosionsfest, sie brauchen deshalb nicht in Schutzkolben eingebaut zu werden. Meist sind es Stäbe der verschiedensten Abmessungen oder für grosse Stromstärken Scheiben und Ringe.

Fig. 2 A zeigt die grundsätzliche Schaltung für die Spannungsregelung, wobei der Verbraucher *b* durch den Heissleiter *a* geregelt wird. *c* stellt einen Vorschaltwiderstand dar, ohne den kein zusätzlicher Spannungsabfall erzeugt werden könnte. Das Schalt-

[1]) siehe Literaturverzeichnis am Schluss des Artikels.

bild in Fig. 2 B stellt den Heizkreis eines Radiogerätes dar. Der Heissleiter *a* hat hier die Aufgabe, den durch den geringen Widerstand der Heizfäden hervorgerufenen erheblichen Einschaltstromstoss, der den Heizfäden der in Serie geschalteten Röhren verschiedener Aufheizkonstante schadet, zu dämpfen und bei zusätzlicher Inserieschaltung

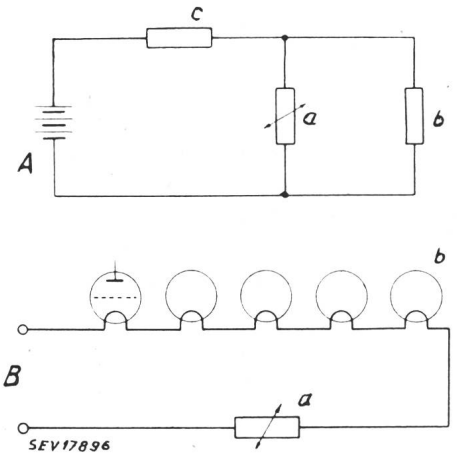

Fig. 2
Die grundsätzliche Art des Einbaues der Heissleiter:
A als Spannungsregler
B als Anlass- und Verzögerungselemente
a Heissleiter
b Verbraucher
c Vorschaltwiderstand

einer Glühlampe diese vor der Zerstörung zu schützen. Dieses Beispiel ist typisch für Heissleiter als Stromregler. Will man Heissleiter als Temperaturfühler verwenden, so kann man bei konstanter Spannung den Durchflußstrom messen, der so klein zu halten ist, dass er die Temperatur kaum verändert. Bei genaueren Messungen verwendet man die Temperaturfühler in Brückenschaltungen.

4. Ausgangswerkstoffe und ihre physikalischen Eigenschaften

Heissleitereigenschaften haben die meisten Oxyde, einige Sulfide, Haloide und Nitride. Wesentlich ist, dass die Stromleitung mit Elektronen vor sich geht und nicht mit Ionen, bei welchen durch Gleichstrombelastung eine Zersetzung eintritt. Mindestens soll die Ionenleitung möglichst gering sein, oder sollen durch besondere technische Massnahmen die Ionen wieder ersetzt werden. Reine Elektronen-Leiter sind nach *A. Smekal* vorwiegend Verbindungen von denjenigen Metallen, die mehr als eine Valenzstufe annehmen können [4]. Von diesen verwendet man in der Technik Oxyde oder Oxydmischkristalle, so dass es sich erübrigt, auf die anderen Stoffe einzugehen.

Nach den Literaturangaben sind folgende Werkstoffe für die Herstellung von Heissleitern gebräuchlich:

a) Uranoxyd,
b) Kupferoxyd,
c) Chromoxyd, Nickeloxyd und Manganoxyd,
d) Oxydische Mischwerkstoffe auf der Spinellbasis und in neuester Zeit
e) Werkstoffe auf metall-keramischer Basis besonderer Anordnung.

Sieht man sich in der Literatur die Widerstandswerte der elektronisch leitenden Oxyde an, so wird man sehr widersprechende Angaben finden, da schon kleine Sauerstoffkonzentrationsänderungen in der Nähe des stöchiometrischen Verhältnisses zu erheblichen Leitfähigkeitsänderungen führen, oder anders gesagt, weil es im Bereich der Untersuchungen der Elektronenverhältnisse in einem Molekülverband den integralen Begriff des stöchiometrischen Verhaltens nicht gibt. Hier liegt auch der Grund für die Schwierigkeiten, reproduzierbare Werkstoffverhältnisse zu schaffen.

Faraday soll zuerst auf die erhebliche Temperatur-Widerstandsänderung von Salzen hingewiesen haben [5]. Die erste industrielle Verwendung von Oxydwiderständen ist unseres Wissens der *Nernst*-Stift [6], der zwar nur indirekt als Regler bezeichnet werden kann, dessen Erfindung aber viele Techniker angeregt hat, die sich mit dem Verhalten der Oxyde befassten.

Das Material der zuerst bekannt gewordenen Heissleiter, welche ausschliesslich für Regelzwecke dienten, war Uranoxyd [7]. Heute werden aus naheliegenden Gründen Uranoxyde wohl nur für kleinste Ausführungsformen verwendet.

Wie weit man das an zweiter Stelle genannte Kupferoxyd [8] heute noch verwendet, ist unbekannt. Vermutlich ist der verhältnismässig geringe Regelfaktor der Grund, weshalb Kupferoxyd nicht mehr von Interesse ist.

Die Werkstoffe der dritten Gruppe waren der Gegenstand eingehender Untersuchungen in den USA. Fig. 3 zeigt nach *K. P. Dowell* [9] ein Dia-

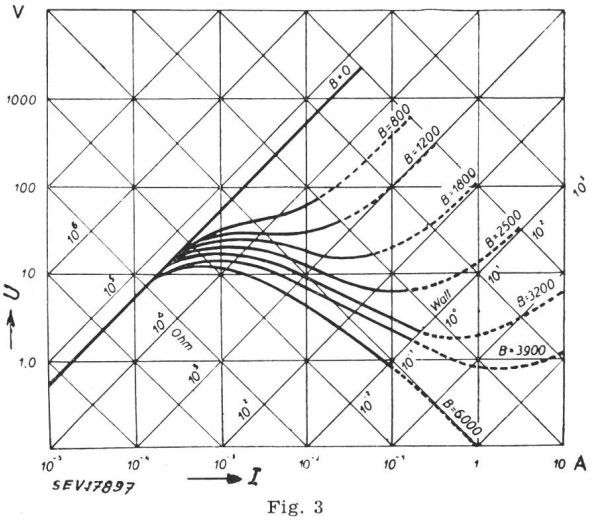

Fig. 3
Strom-Spannungsverlauf verschiedener heissleitender Metalloxydmischungen
nach K. P. Dowell
$C = 5 \cdot 10^{-4}$ W/Grad; $R = 50\,000\ \Omega$; $T_0 = 300$ °K

gramm, welches neben dem Strom-Spannungsverlauf in geschickter Darstellung die Widerstands- und die Belastungswerte abzulesen erlaubt. Die Kurven zeigen, wie weit mit verschiedenen Oxydzumischungen die Regelfaktoren der Ausgangswerkstoffe beeinflusst werden können. Gleichzeitig gibt die Fig. den grundsätzlichen Strom-Spannungsverlauf von Heissleitern genügender Regelwirkung wieder. Die ver-

wendeten Oxyde sind im kalten Zustand mehr oder weniger Isolatoren. Bekannt ist bei dem erwähnten Nernst-Stift, dass er durch eine um den Stift gelegte Drahtheizung erst auf eine gewisse Temperatur gebracht werden musste, ehe die Leitfähigkeit des Stiftes genügend gross war, sich selber weiter aufzuheizen. Diese störende Eigenschaft haben alle

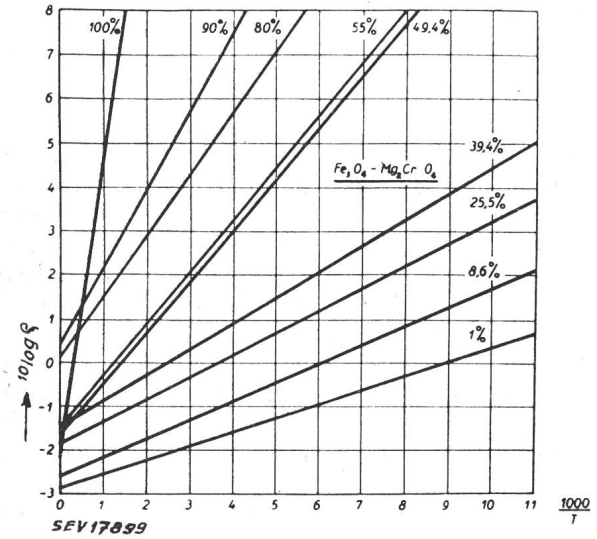

Fig. 4
Leitfähigkeits-Temperaturfunktion für verschiedene Spinelle nach E. J. W. Verwey, P. W. Haayman und F. C. Romeyn
T Temperatur
ρ spezifischer Widerstand

Oxyde; sie wird auch durch das Diagramm bestätigt. Erst nachdem eine gewisse Spannung überschritten ist, steigt die Temperatur, und die Spannung an den Klemmen sinkt auf einen niederen Wert.

Die Oxydmischungen stellen vermutlich schon Kristallgefüge dar mit Überschussanteilen der einzelnen Komponenten und leiten somit zu den Spi-

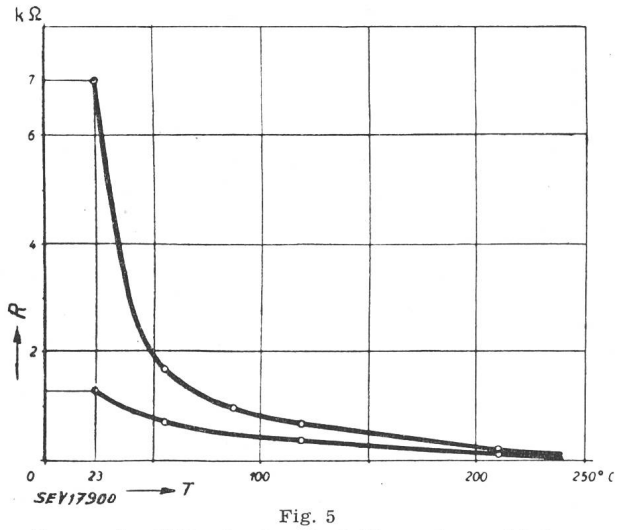

Fig. 5
Temperatur-Widerstandsverlauf für zwei verschiedene Kapillarheissleitertypen

nellen über: Kristallen, in welchen eine definierte Aufbauanordnung die Korrosionsfestigkeit erhöhen kann.

Die Magnesium-Titanspinelle sind früher in Deutschland produziert worden. Die Eisenspinelle sind zurzeit Gegenstand industrieller Forschung. Über die letztgenannten Spinelle liegt eine Arbeit von *E. J. Verwey* und Mitarbeitern [10] vor, der die Fig. 4 entnommen ist. Mit ihr werden Leitfähigkeits-Temperaturfunktionen dargestellt, deren Auswertung einen Einblick in die grundsätzlichen Zusammenhänge der elektrischen Eigenschaften der heissleitenden Werkstoffe gibt.

Der Werkstoff der letzten Gruppe ist die neue Kapillarhalbleitermasse [11], aus der Kapillarheissleiter erzeugt werden. Diese sind durch das Widerstands-Temperaturdiagramm der Fig. 5 gekennzeichnet. Der Werkstoff besteht aus Mischungen von Metallen mit Nichtmetallen in besonderer Anordnung.

Die physikalischen Daten der Heissleiter aus diesen verschiedenen Werkstoffen sind, soweit sie zur Verfügung standen, weiter unten zusammengefasst.

5. Technische Ausführungsformen

Vorzugsweise werden Heissleiter auf dem Sinterwege hergestellt. Man geht also von der Verarbeitung von Pulvern aus, die in diesem Fall besonders sorgfältig aufbereitet werden müssen, da schon geringe chemische Verunreinigungen zu ungleichmässigen Widerstandswerten führen. Auch die physikalische Beschaffenheit ist ausschlaggebend: die Korngrössenverteilung muss gleichmässig sein, ebenso wie die Art der einzelnen Pulverpartikel. Nach der Aufbereitung werden die Pulver unter Druck trocken in Stahlmatrizen oder feucht in Strangpressen verformt und nach allfälligem Trocknen durch hohe Temperaturen unter bestimmten Schutzgasbedingungen verfestigt, d. h. gesintert. Die entstandenen Sinterkörper müssen zur Beeinflussung der elektrischen Werte noch gealtert werden. Hierzu werden sie wieder unter definierten Temperatur- und Gasbedingungen Temperaturen ausgesetzt, die oberhalb der vorgesehenen Betriebstemperatur liegen. Damit ist der keramische Widerstandskörper fertig zur Befestigung der metallischen Stromzuführungen. Hier sind verschiedene Verfahren eingeführt: man kann die Enden versilbern und dann durch Preßsitz einen Metallring aufziehen oder auch auf die versilberte Oberfläche einen metallischen Anschluss anlöten. Bei Kleinstausführungen besteht die Möglichkeit, Platindrähte einzusintern. Kapillarheissleiter können mit den Stromzuführungen nach einem besonderen Verfahren unmittelbar verschweisst werden, so dass eine einwandfreie Verbindung entsteht.

Die Kleinstausführungen sind aus Festigkeitsgründen zur Abschirmung gegen Luftströmungen, zur Beeinflussung der Wärmeübergangsverhältnisse und teils auch aus Korrosionsgründen in Schutzkolben eingebaut.

In Tabelle I sind die einzelnen Ausführungsformen und die entsprechenden physikalischen Werte zusammengestellt.

Physikalische und technische Eigenschaften verschiedener Heissleiter Tabelle I

Herstellbarer Bereich von Kaltwiderstandswerten	Temperaturkoeffizient in % bei 20 °C [*) bei 25 °C]	Grössenordnung des Regelfaktors (Kaltwert/Warmwert)	Höchste Betriebstemperatur		Grössenordnung der Betriebsleistung	Grössenordnung der Erwärmungsträgheit
			in Schutzkolben	in Luft		
Ω	%	Ω/Ω	°C	°C	W	s
I. Reine Oxyde a) Uranoxyd						
$5 \cdot 10^3 ... 10^5$	—1,5	200	600		0,001...1	0,1...10
b) Kupferoxyd						
$0{,}5 ... 10^5$	—2,6	10		220	0,001...4	1...100
II. Oxydgemische (Chrom, Nickel, Mangan, Cobalt)						
$10 ... 10^6$	—3...—4,5*)	10...200	300	150	0,01...6	1...100
III. Spinelle (Mangan-, Titan-Spinell)						
$10^3 ... 10^5$	—1,3...—2,3	200...500	500		2,5...9	10...600
IV. Metall — Nichtmetallgemische (Kapillarheissleiter)						
$0{,}1 ... 5 \cdot 10^6$	—2...—4	5...500	600	450	0,005...100	0,1...600

6. Die Spannungsregelung

Die schon grundsätzlich angedeutete Form der Spannungsregelung ist dann schwierig durchzuführen, wenn der zum Inbetriebsetzen des Heissleiters notwendige Strom durch die zu geringe vorhandene Netzspannung nicht ausreicht. Der Verlauf des «Spannungsberges» sei durch einen Blick auf die Fig. 3 noch einmal in das Gedächtnis zurückgerufen. Bei etwa 10^{-3} A ist der Spannungsabfall grösser als bei etwa 10^{-2} A, also bei einem Strom, bei welchem die Regelwirkung bereits eingesetzt hat. Dieser Spannungsberg muss in vielen Fällen zum Anfahren überwunden werden. Beim Nernst-Stift wurde dies durch eine zusätzliche äussere Heizung erreicht, und man hat diese Form des Anfahrens für Regler beibehalten. Es werden also Ausführungsformen verwendet, bei denen der Heissleiter durch eine kleine Heizspirale oder durch einen in die Masse eingesinterten Draht aufgeheizt werden. Der Heissleiter hat in diesem Fall 3 oder 4 Anschlussdrähte.

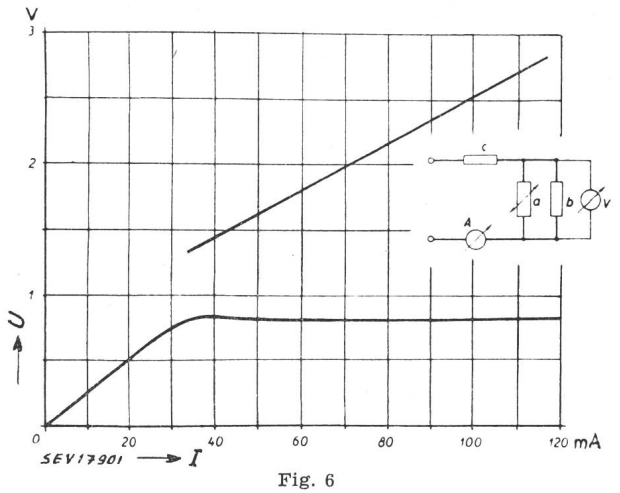

Fig. 6
Regelvorgang gesteuert durch Heissleiter
Die obere Kurve gibt die variierte Klemmenspannung, die untere die geregelte Spannung am Verbraucher wieder
Bezeichnungen wie Fig. 2

Fig. 6 zeigt eine Regelkurve, bei welcher infolge des Aufbaues der heissleitenden Masse und infolge der geringen auszuregelnden Spannung kein Spannungsberg auftritt. Somit kann man auf eine zusätzliche Heizung verzichten. Die obere Kurve der Fig. stellt die variierte Spannung dar, während die untere der Spannung am Verbraucher *b* entspricht. Es ist ersichtlich, wie auch grosse Spannungsdifferenzen ausgeregelt werden können, eine Eigenschaft der Heissleiter, die vor allem die Funktechnik verwertet. Der verwendete Heissleiter-Typ wiegt nur einige Milligramm, er ist dünn und lang, die zu vernichtende Energie kann unmittelbar durch Strahlung emittiert werden, so dass der Heissleiter auch schnellen Spannungsschwankungen sich anpassen kann (strahlungsinduktive Spannungsregelung).

7. Die Stromregelung

Unter gewissen Voraussetzungen ist es möglich, durch die Kombination von Heissleitern mit Kaltleitern — z. B. den Heizfäden von Elektronenröhren — eine spannungsabhängige Stromregelung aufzubauen. Diese ist aber technisch nicht leicht zu erreichen. Ihre Beschreibung würde hier zu weit führen.

Technisch mehr angewandt und deshalb interessanter ist die Regelung bzw. Dämpfung des Einschaltstromstosses von Verbrauchern mit geringem Kalt- bzw. Ruhewiderstand, wie sie einerseits Heizfäden von Elektronenröhren, Glühlampen, Ofenwicklungen usw., andererseits Motoren, Transformatoren usw. darstellen. Der hohe Kaltwiderstandswert des Heissleiters begrenzt während des Anfahrens den Strom, bis durch die höhere Temperatur des Verbrauchers bzw. durch die aufgebaute Gegenspannung dieser selbst einen überhöhten Stromdurchgang verhindert. Der Heissleiter arbeitet in diesem Fall mehr oder weniger als Verzögerungswiderstand, der Einschalt-Stromstoss wird durch die Aufheizkapazität des Heissleiters vernichtet (kapazitive Stromregelung).

In Fig. 7 sind die Einschaltverhältnisse für den Heizkreis eines Radioapparates dargestellt. *c* ist die Netzspannung, *a* die Spannung an den Heizfäden der in Serie geschalteten Röhren und *b* die Spannung am Heissleiter. Der Spannungsverlauf ist in Funktion der Zeit aufgetragen. Im Punkt 0 wird

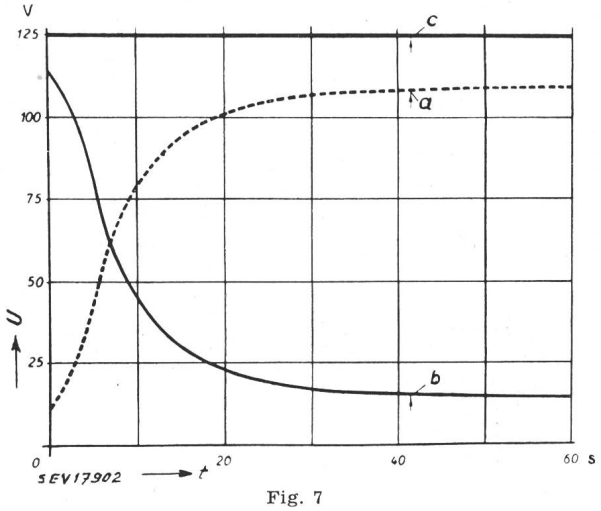

Fig. 7
Der Spannungsverlauf nach dem Einschalten
a am Verbraucher (Serieröhren)
b am Heissleiter
c Netzspannung ($c = a + b$)

eingeschaltet. Man sieht, wie die Spannung an den Röhren sich der Temperatur der Röhren anpasst und welche Entlastung durch den Heissleiter erreicht wird. Der Gesamtstrom bleibt gering, so dass auch die in den Heizkreis üblicherweise eingebaute Skalenbeleuchtungslampe nicht durchbrennen kann.

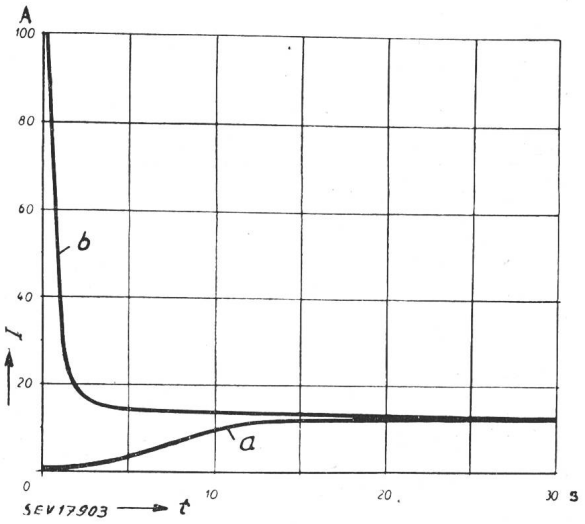

Fig. 8
Der Stromverlauf nach Einschalten einer Lampe von 150 W, 12 A
a mit Kapillarheissleiter
b ohne Kapillarheissleiter

Fig. 8 zeigt die Stromverhältnisse bei grösseren Stromstärken. Der Einschaltstromstoss von 100 A fällt bei einer Glühlampe nach dem Aufheizen der Wolframfäden auf 12 A. Bei Verwendung eines Heissleiters beginnt die Lampe langsam zu glühen und erreicht nach etwa 15 s den gewünschten Sollstrom. Neben der Beseitigung von Störungen innerhalb des Netzes, der Entlastung der Sicherungen und anderen Vorteilen ist auch die Lebensdauer der mit Heissleiter kombinierten Lampen grösser. Auch hier wird durch immer vorhandene Ungleichheiten des Querschnittes der engste Querschnitt durch Überströme immer gefährdet sein, und tatsächlich wird ein jeder schon selbst festgestellt haben, dass die meisten Glühlampen vor ihrer Zerstörung beim Einschalten kurzzeitig aufleuchten. Bei dem Einschalten mit Stromregelung werden die Heizfäden also erheblich geschont.

8. Anwendungen in Geräten

Nach der Darstellung der grundsätzlichen Zusammenhänge und nach der Kennzeichnung der Ausführungsformen sollen einige Geräte beschrieben werden, in welchen die Heissleiter die wesentlichen Funktionsträger sind; ausserdem werden die bisher nicht genannten Anwendungsformen erwähnt.

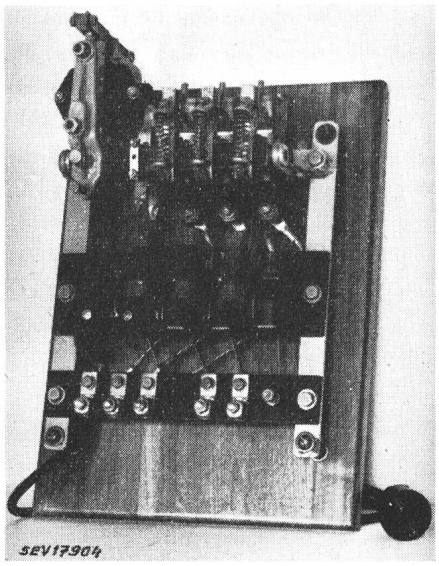

Fig. 9
Dreiphasen-Motoranlasser mit Heissleitern

Fig. 9 zeigt Heissleiter in einem 3-Phasen-Motoranlassgerät. Hier ist der Heissleiter ein neues Mittel zur stufenlosen Einschaltung ohne mechanisch bewegte Teile. Hier eröffnet sich vor allem auch für Fernsteuerungen ein weitgehendes Anwendungsfeld. Die abgebildete Ausführungsform nimmt auch auf gewisse Nachteile Rücksicht. Diese bestehen darin, dass die benötigte Abkühlzeit verhältnismässig grosser keramischer Massen erheblich und somit die Schalthäufigkeit begrenzt ist. Bei der Entwicklung solcher Schaltanlagen müssen also Lösungen gesucht werden, bei welchen die Abkühlzeit möglichst herbgesetzt ist. Bei dem abgebildeten Schalter wird der Heissleiter nach dem Inbetriebsetzen des Gerätes kurzgeschlossen und hat nunmehr Zeit, sich abzukühlen. Es wurden auch Anordnungen bekannt, in welchen jeweils zwei Heiss-

leiter für einen Pol vorgesehen sind, die wechselseitig betrieben werden, so dass die Schalthäufigkeit verdoppelt werden kann.

Fig. 10 stellt ein Überspannungsschutzgerät für Freileitungen dar. Die in Scheibenform hergestellten Heissleiter regeln die über eine Luftstrecke einsetzende Entladung gegen Erde und bewirken das Abreissen des Funkens nach dem Abklingen der Überspannung. Hier haben sich heissleitende keramische Werkstoffe besonders bewährt [12].

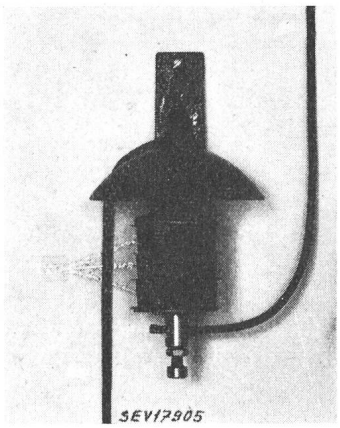

Fig. 10
Überspannungsschutzgerät mit Heissleitern

Als letzte Anordnung wird in Fig. 11 eine Brücke dargestellt, in deren 4 Zweigen jeweils ein Heissleiter mit Fremdheizung Schaltimpulse steuert. Diese Ausführungsform leitet zu der Verwendung der Heissleiter als Verzögerungswiderstand in der Relaistechnik über. Hier können durch Heissleiter Uhrwerke und andere komplizierte Schaltungen ersetzt werden, so dass der Heissleiter in kurzer Zeit dieses in schneller Entwicklung befindliche Anwendungsfeld erobert hat.

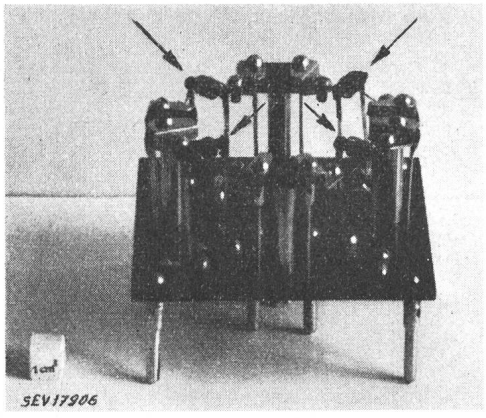

Fig. 11
Heissleiter mit indirekter Heizung in einer Messbrückenanordnung zur Steuerung von Schaltvorgängen
Die Pfeile weisen auf Heissleiter hin

Die Brückenschaltung leitet anderseits zu einem weitern umfangreichen Anwendungsgebiet der Heissleiter über. Das ist die Verwertung der Temperatur-Widerstandscharakteristik der Heissleiter zu Temperaturmesszwecken. Hier sind vor allem in den USA bedeutungsvolle Entwicklungsarbeiten geleistet worden [13, 14, 15, 16], die sich auf die Temperaturregelung und auf die Pyrometrie beziehen. Gegenüber anderen Temperaturfühlern der elektrischen Messtechnik können zwei Faktoren hervorgehoben werden:

a) die alle anderen Werkstoffe übertreffende Sensibilität des Temperaturganges und

b) Widerstandswerte, die die Verwendung hoher Spannungen ermöglichen.

Während der erste Vorzug zu einer hohen Anzeigegenauigkeit oder bei gleichwertiger Messwertwiedergabe zu billigen Anzeigeinstrumenten führt, eröffnet der zweite Vorteil die Möglichkeit der Messwertübertragung auf weite Entfernungen. Heissleiter finden also demzufolge Verwendung in Ferntemperaturmessgeräten und Präzisionsthermometern, wie sie auch Pyrometer darstellen. Zur Überwachung der Temperatur in rotierenden Maschinenteilen, beispielsweise in Wicklungen von Motoren usw., ist der Heissleiter dem Thermoelement überlegen, da bei der Übertragung auf den Stator höhere Spannungen angelegt werden können, als in Thermoelementen entstehen.

Als Anzeigegeräte kann man Strommessgeräte verwenden, wenn man unmittelbar Temperaturfühler und Messgeräte hintereinanderschaltet. Genauere Messresultate erhält man in Kreuzspulinstrumenten oder noch besser in Messbrücken. Neben der Temperaturmessung kann man natürlich mit ähnlichen Anordnungen auch Thermostaten betreiben oder Warnanlagen, die bei einer einstellbaren Temperatur ansprechen.

Die kleinen Ausführungsformen der Temperaturfühler mit einigen hundertstel Millimeter Durchmesser erlauben einen Einbau in kleinen Sonden, die zur intravenösen Bluttemperaturmessung und in anderen medizinischen Geräten Verwendung gefunden haben. Vor allem ergeben sich für diese Ausführungsformen neue Aussichten für die Bluttemperaturmessung in Krankenhäusern, da die kleinen Massen der Sonden eine unmittelbare Temperaturablesung ermöglichen, im Gegensatz zu üblichen Quecksilberthermometern.

Eine unter anderen in der Radiotechnik Verwendung findende Anordnung ist die der Parallelschaltung der Heissleiter zu irgendwelchen Verbrauchern, etwa zu den Skalenbeleuchtungslampen. Ist die Lampe in Funktion, so ist der Widerstand gegenüber dem des Heissleiters so gross, dass durch ihn nahezu kein Strom fliesst. Fällt die Lampe aber aus, so tritt der Heissleiter in Funktion, sein Betriebswiderstand wird gering und das ungestörte Weiterarbeiten des Stromkreises ist gesichert. Gleichzeitig kann in diesem Sperrkreis eine Warnvorrichtung eingebaut werden, die den eingetretenen Schaden meldet.

Als letztes Anwendungsgebiet sei das der Kompensation des Temperaturganges metallischer Leiter erwähnt. Schaltet man in den Stromkreis mit metallischem Temperaturgang Heissleiter ein, so kann man über grössere Temperaturintervalle absolute Widerstandskonstanz erreichen.

Literatur

[1] *Sachse, W.:* Temperaturabhängige Widerstände (Heissleiter) und ihre Anwendung in der Technik. Siemens Z. Bd. 19(1939), Nr. 5, S. 214...218.

[2] *Roloff, C. C.:* Thermo-Variable Resistors. Electr. Rev. Bd. 140(1947), Nr. 3612, S. 315...316.

[3] *Lange, J.:* Zur physikalischen Chemie der Elektrolythe. Naturwissenschaften Bd. 31(1943), Nr. 31/32, S. 353...366.

[4] *Grimm, H. G.,* u. *H. Wolff:* Atombau und Chemie. In: *Geiger-Scheel:* Handbuch der Physik. Bd. 24. Aufbau der zusammenhängenden Materie. — Berlin, 1933. — S. 954.

[5] *Becker, J. A., C. B. Green* u. *G. L. Pearson:* Properties and Uses of Thermistors — Thermally Sensitive Resistors. Electr. Engng. Transactions section Bd. 65(1946), Nr. 11, S. 711...725.

[6] *Wagner, C.:* Über den Mechanismus der elektrischen Stromleitung im Nernststift. Naturwissenschaften Bd. 31 (1943), Nr. 23/24, S. 265...268.

[7] *D'Ans-Lax:* Taschenbuch für Chemiker und Physiker. — Berlin, 1943. — S. 1585.

[8] *Friedrich, E.:* Z. Physik Bd. 34(1925), S. 637.

[9] *Dowell, K. P.:* Thermistors as Components Open Product Design Horizons. Electr. Manufacturing Bd. 1948, S. 84...95.

[10] *Verwey, E. J. W., P. W. Haayman* u. *F. S. Romeyn:* Halbleiter mit grossem negativen Temperaturkoeffizient des Widerstandes. Philips techn. Rdsch. Bd. 9(1947/48), Nr. 8, S. 239...249.

[11] *Meyer-Hartwig, E.:* Studien über Halbmetalle mit kontinuierlichen Übergangseigenschaften zwischen Metall und Keramik: Kapillarhalbleiter V. Österr. Chemiker-Z. Bd. 49(1948), Nr. 10/11, S. 197.

[12] *Gantenbein, A.:* Neuere Forschungsergebnisse im Überspannungsableiterbau. Bull. SEV Bd. 32(1941), Nr. 25, S. 695...699.

[13] *Deeter, E. L.:* Null Temperature Bridge — The Electron Art. Electronics Bd. 21(1948), Nr. 5, S. 180...186.

[14] O. S. R. D. Report No. 4699, Appendix C: The Use of Thermometers to measure Temperature and Wind Velocity u. S. Dept. of Commerce, Bureau of Publication Report No. PB 13103.

[15] *Drummeter, L. F.,* u. *W. G. Fastie:* A simple Resistance Thermometer for Blood-Temperature Measurements. Science Bd. —(1947).

Adresse der Autoren:

E. Meyer-Hartwig und *H. Federspiel,* Laboratorio Terlano della FES., Via Marconi, Terlano (Italien).

Die Leitungscharakteristiken des erdschlussbehafteten Drehstromsystems

Von *E. Königshofer,* Wien

621.315.025.3

Unter den Charakteristiken eines Energieübertragungsmittels ist die Betriebskapazität die Resultierende zweier Komponenten, deren Anteile von der Spannung und somit vom Isolationszustand abhängen. Ein genaues Verfahren zu ihrer quantitativen Erfassung wird besprochen und die Abhängigkeit der Grösse der Betriebskapazität vom Isolationszustand der Leitung, das heisst von der Verlagerungsspannung untersucht.

Parmi les valeurs caractéristiques d'un moyen de transmission d'énergie la capacité de service représente la résultante de deux composantes, dont les parties dépendent de la tension et de l'isolement. Un procédé exact pour sa détermination quantitative sera développé. Les relations entre la grandeur de la capacité de service et l'isolement de la ligne de transmission seront étudiées.

Die Übertragungsfähigkeit eines Leitungssystems ist durch den Wellenwiderstand bestimmt, der beim Drehstromsystem die Grösse

$$\underline{Z} = \sqrt{\frac{R + j\omega L}{G + j\omega C}}$$

aufweist (R Ohmscher Widerstand, ω Kreisfrequenz, L Selbstinduktionskoeffizient, G Ableitung [Leitwert] und C Betriebskapazität des Übertragungsmittels). Für Aufgaben der Praxis ist es zulässig, die Ableitung zu vernachlässigen und mit dem Werte

$$\underline{Z} = \sqrt{\frac{R + j\omega L}{j\omega C}}$$

zu rechnen. R und L sind charakteristische Grössen des Leitermaterials, der Leiterstärke und -anordnung, welche durch das Auftreten eines Erdschlusses im Zuge des Übertragungsmittels nicht beeinflusst werden. Die Betriebs- oder Netzkapazität C ist hingegen ein aus dem Zusammenwirken von Erdkapazität C_e und gegenseitigen Kapazitäten C_p resultierender Wert; die Anteile der Komponenten werden durch die jeweiligen Spannungsverhältnisse beeinflusst. Ausser als Komponente des Wellenwiderstandes ist C — neben der Betriebsspannung und der Frequenz — das Mass für Ladestrom und -leistung. Die Komponenten C_e und C_p sind, wie jede Kapazität, durch Abmessung und Lage der Beläge bestimmt, ihre Anteile erfahren jedoch bei einer erdschlussbehafteten Leitung Änderungen, die durch die Verzerrung des Spannungsdreieckes bedingt sind. Eine vollkommen verdrillte Drehstromleitung weist Gleichheit der Betriebskapazitäten der drei Pole auf und bei Symmetrie des Spannungsdreieckes auch Gleichheit der Ladeströme und -leistungen. Es ist allgemein üblich, Ladestrom I_C und Ladeleistung P_C wie folgt zu bestimmen (l Länge des Übertragungsmittels in km, U verkettete Spannung, $U_p = \frac{U}{\sqrt{3}}$ Polspannung in V, C Betriebskapazität in μF/km):

$$I_C = l\, U_p\, \omega C \qquad \text{A}$$

und

$$P_C = l\, U^2\, \omega C \cdot 10^{-3} \text{ kVA}$$

Diese Ausdrücke sind jedoch nur als Näherungsformeln zu werten. Für die Kraftübertragung auf weite Entfernungen lassen sich I_C und P_C genau nach den diese Übertragung erfassenden Berechnungsverfahren ermitteln: Zwischen den Strömen und Spannungen am Anfang des Übertragungsmittels $\underline{I}_1$ und $\underline{U}_1$, an seinem Ende $\underline{I}_2$ und $\underline{U}_2$, bzw. $\underline{I}$ und $\underline{U}$ an einem beliebigen Punkt der Leitung im Abstand x vom Anfangs- bzw. Endpunkt, bestehen die Beziehungen

$$\underline{U} = \underline{U}_1 \cosh \gamma x - \underline{I}_1\, \underline{Z} \sinh \gamma x$$

$$\underline{I} = \underline{I}_1 \cosh \gamma x - \frac{\underline{U}_1}{\underline{Z}} \sinh \gamma x$$