

Zeitschrift: Bulletin de l'Association suisse des électriciens
Herausgeber: Association suisse des électriciens
Band: 35 (1944)
Heft: 19

Artikel: Untersuchungen an thermoplastisolierten Leitern
Autor: Zürcher, M.
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-1056989>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. 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. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

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. [Voir Informations légales.](#)

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. [See Legal notice.](#)

Download PDF: 25.12.2024

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

auf an das Starkstromnetz angeschlossen; dann wird das im Apparatendeckel enthaltene Metallgewebe zu ebener Erde ausgebreitet und an die Erdklemme

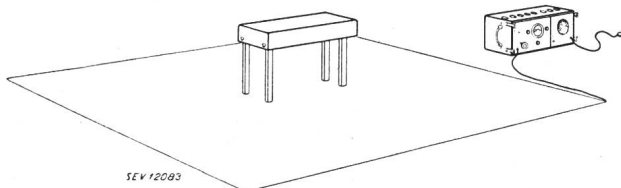


Fig. 3.
Störspannungsprüfer, betriebsbereit

des Apparates angeschlossen; und endlich werden die im Apparatendeckel enthaltenen Stützen aufgekloppt, so dass der Deckel als isolierendes Stativ von 40 cm Höhe über dem Gegengewicht dient (vgl. Fig. 3).

Der Störspannungsprüfer hat die in ihn gesetzten Erwartungen erfüllt. In einer grösseren Serie hergestellt, dient er heute nicht nur den Amtsstellen der PTT-Verwaltung, sondern auch dem SEV, der Pro-Radio, der Industrie, den Elektrizitätswerken usw.; zudem sind verschiedene Exemplare von ausländischen Institutionen übernommen worden.

Untersuchungen an thermoplastisolierten Leitern

Mitgeteilt von der Materialprüfanstalt des SEV (M. Zürcher).

621.315.616.96

Der Ersatz von Gummi durch Thermoplaste im Leiterbau bedingt auch eine Erweiterung der Prüfmethode für thermoplastisolierte Leiter. Da die Leiternormalien des SEV unter der Voraussetzung von Gummi als Isoliermaterial aufgestellt wurden, genügen sie nicht mehr für die Beurteilung von thermoplastisolierten Leitern. Messungen des spez. Widerstandes des Isolierschlauches von einadrigen Leitern und des Berührungstromes von mehradrigen Leitern in Abhängigkeit von der Temperatur zeigen, dass diese beiden Grössen zur Beurteilung von verschiedenen Leiterqualitäten verwendet werden können. Aus den Messungen geht einerseits die Beständigkeit guter Thermoplaste gegenüber Wasser hervor und es werden andererseits die Grundlagen gegeben für Minimalanforderungen, die heute an Thermoplastisolationen gestellt werden können.

Le remplacement du caoutchouc par des matières thermoplastiques dans la fabrication des conducteurs isolés exige également une extension des méthodes d'essais de ces nouveaux conducteurs. Les normes de l'ASE ne suffisent plus pour juger de la valeur des conducteurs à isolation thermoplastique, car ces normes sont basées sur l'emploi du caoutchouc comme matière isolante. Des mesures de la résistivité de la gaine isolante de conducteurs à un seul fil et du courant de contact de conducteurs à plusieurs fils en fonction de la température montrent que ces deux valeurs peuvent servir à estimer la qualité de différentes sortes de conducteurs isolés. Ces mesures permettent, d'une part, de constater que les matières thermoplastiques de bonne qualité résistent convenablement à l'eau et, d'autre part, de déterminer les exigences minima auxquelles doivent maintenant satisfaire les isolations thermoplastiques.

Infolge der kriegsbedingten Gummiknappheit müssen heute zur Herstellung von isolierten Leitern und Kabeln Austauschstoffe verwendet werden. Als solche kommen hauptsächlich Derivate von Polyvinylchlorid unter Zusatz von verschiedenen Weichmachern zur Anwendung, die von diversen Firmen unter geschütztem Namen, z. B. Soflex, Plastoflex, Plastosyn, in den Handel kommen. Da es sich hier um Neustoffe handelt, deren Eigenschaften nicht ohne weiteres mit denen von Gummi verglichen werden können, genügen die Leiternormalien des SEV, welche unter der Annahme von Gummi als Isoliermaterial aufgestellt worden waren, nicht mehr für eine Beurteilung dieser Neustoffe. Es mussten daher neue Kenndaten gesucht werden, welche eine einwandfreie Charakterisierung der verschiedenen Thermoplastqualitäten des Handels ermöglichen. Eine typische Eigenschaft dieser Thermoplaste ist die starke Temperaturabhängigkeit ihres spez. Widerstandes und damit des Isolierwiderstandes, welche speziell für die praktische Anwendung von Bedeutung ist.

Messung des Isolationswiderstandes in Abhängigkeit von der Temperatur

Aderabschnitte von 2,5 m Länge werden in 4 Windungen von ca. 15 cm Durchmesser aufgewunden und in einen Wasserthermostaten gebracht. Die Länge der aus dem Wasser herausragenden Leiterenden beträgt je 25 cm, so dass eine Prüflänge von genau 2 m benetzt wird. Vor der Messung werden

die Leiter während 24 Stunden in Wasser von Raumtemperatur gelagert. Die Messung des Isolationswiderstandes erfolgt mit Gleichstrom von 1000 V zwischen Leiterseele und Wasserbad. Die Temperatur des Thermostaten wird, bei 10 bis

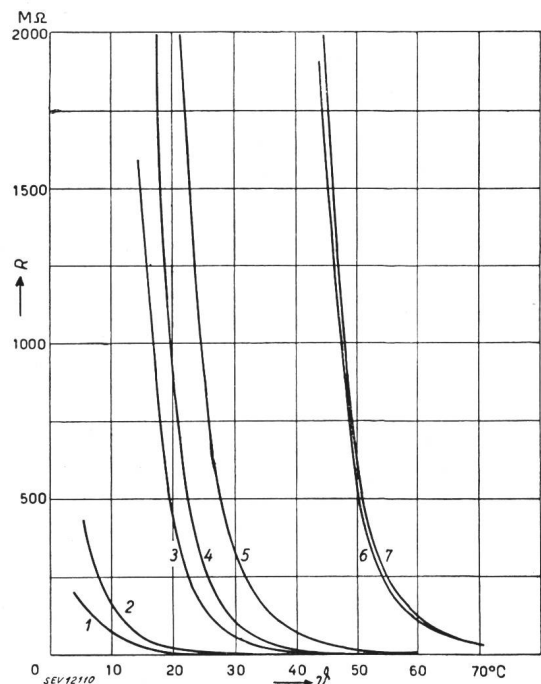


Fig. 1.

Isolationswiderstand (R) in Funktion der Temperatur (ϑ) bei Gleichstrom von 1000 V, Drahtmuster von 2 m Länge. Erklärung der Kurvenbezeichnung in Tabelle I.

20° C beginnend, innerhalb 7 bis 8 Stunden auf 70° C gesteigert. Vor jeder Messung wird die Temperatur durch ein Kontaktthermometer bei intensiver Rührung während ca. 1/2 Stunde auf 0,1° C konstant gehalten. Bei höheren Temperaturen wird auf die Wasseroberfläche etwas Paraffin gegeben, um Störungen durch Dampf und Kondenswasser zu vermeiden. In Tabelle I sind die Messresultate von 4 verschiedenen schweizerischen Fabrikaten (erhalten Dezember 1942 und Januar 1943) zusammengestellt und in Fig. 1 graphisch dargestellt.

Isolationswiderstand in Funktion der Temperatur bei 1000 V Gleichspannung in Megohm.

Tabelle I

Wasser-temp. °C	Fabrikat A		Fabrikat B		Fabr. C	Fabrikat D	
	1	2	3	4	5	6	7
6	140	400	> 4000	> 4000	> 4000	> 4000	> 4000
10	68	182	> 4000	> 4000	> 4000	> 4000	> 4000
13	33	90	2400	> 4000	> 4000	> 4000	> 4000
15	23	56	1400	3200	> 4000	> 4000	> 4000
17	15,8	43	900	2000	> 4000	> 4000	> 4000
20	9,0	24	425	900	2400	> 4000	> 4000
23	5,5	14,3	220	440	1300	> 4000	> 4000
26	3,3	8,9	115	225	690	> 4000	> 4000
30	1,9	4,9	53	105	330	> 4000	> 4000
35	0,92	2,4	22	39	140	> 4000	> 4000
40	0,50	1,2	9,8	17,2	65	> 4000	> 4000
45	0,27	0,68	4,5	8,0	32	1500	1700
50	0,15	0,35	2,2	3,8	15,5	500	560
55	0,09	0,22	1,15	2,0	8,2	210	240
60	0,06	0,14	0,70	1,2	4,8	107	120
65	<0,04	0,08	0,40	0,7	2,8	55	58
70	<0,04	0,05	0,23	0,45	1,7	33	30

Fabrikat A	Muster	1	T-Draht	6 mm ² schwarz
	»	2	»	1 mm ² »
»	B	3	»	6 mm ² rot
	»	4	»	1,5 mm ² grün
»	C	5	»	2,5 mm ² blau
»	D	6	»	1 mm ² rot
	»	7	»	2,5 mm ² grün

Die Widerstand-Temperaturkurven weisen einen Verlauf auf, der für die Thermoplaste charakteristisch ist. Die Einstellung des Gleichgewichtes mit der Temperatur erfolgt sofort und ist bei guten Thermoplasten vollkommen reversibel. So wurden z. B. bei 6maligem Erwärmen auf 70° C innerhalb von 10 Tagen, während welcher die Leiter dauernd im Wasser lagen, immer wieder dieselben Kurven erhalten. Einzig bei einigen schlechten Thermoplasten, die auch infolge einer Durchschlagspannung von weniger als 8 kV beanstandet werden mussten, wurde nach 6tägiger Wasserlagerung eine Abnahme des Isolationswiderstandes um ca. 50 % beobachtet, während gleichzeitig gewichtmässig eine Wasseraufnahme von 0,5...2 % festgestellt wurde, was bei guten Thermoplasten nicht der Fall ist. Da ferner auch Messungen an kürzeren Stücken, die in Quecksilber oder in warmer Luft ausgeführt wurden, dieselben Resultate zeigten, ergibt sich, dass gute Thermoplaste gegenüber Wasser beständig sind und die Isolationsmessungen ohne Bedenken im Wasserbad ausgeführt werden können.

Die grossen Unterschiede in den Isolationswiderständen zwischen den einzelnen Fabrikaten, die aus Tabelle I ersichtlich sind, sowie die im Verlaufe des

letzten Jahres bei fast allen Fabrikaten festgestellte ständige Herabsetzung der Isolationswerte thermoplastischer Kabel und Drähte, veranlasste die Materialprüfanstalt des SEV aus sicherheitstechnischen Gründen bestimmte Minimalwerte für die Isolationswiderstände vorzusehen.

Der Grund zu der ständigen Verminderung der Isolationsfestigkeit der thermoplastischen Massen liegt einerseits in dem bekannten Mangel an hochwertigen Weichmachern, andererseits in dem Bestreben der Fabrikanten, die Kälteempfindlichkeit der thermoplastisierten Leiter zu verbessern, was aber vorläufig nur auf Kosten der Isolationsfestigkeit, durch vermehrte Zumischung von Weichmachern möglich ist.

Spezifischer Widerstand der Isoliermasse

Die Adern thermoplastisierter Leiter sind im allgemeinen direkt mit Masse umspritzt, so dass ein Schlauch mit annähernd gleicher Wandstärke und somit definiertem Querschnitt vorliegt, an welchem, unter der Voraussetzung eines Hohlzylinders, unabhängig von der Wandstärke und dem Leiterquerschnitt die Umrechnung des gemessenen Isolationswiderstandes R in Ohm auf den spez. Widerstand ϱ in Ohm·cm der Isoliermasse folgendermassen

möglich ist: Allgemein gilt $\varrho = \frac{R \cdot q}{l}$

Betrachtet man einen Isolierschlauchabschnitt von der Länge L , dessen Isolationswiderstand R durch Messung bekannt ist, als einen Hohlzylinder vom Radius r und der Dicke dr , in dem der Strom von der Achse radial nach aussen fliesst, so ist der durchflossene Querschnitt q gleich der Zylinder-

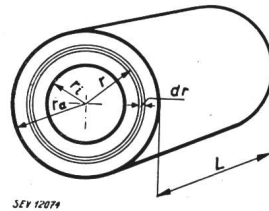


Fig. 2.

oberfläche: $q = 2 \pi rL$. Da in diesem Falle (Fig. 2), d. h. bei radialem Stromverlauf für l , dr zu setzen ist, gilt für

$$\varrho = \int \frac{R \cdot 2 \pi L \cdot r}{dr} \text{ oder } \varrho = \int \frac{R \cdot 2 \pi L}{\frac{dr}{r}}$$

Für einen Hohlzylinder vom Aussenradius r_a und vom Innenradius r_i folgt dann

$$\varrho = \frac{R \cdot 2 \pi L}{\int_{r_i}^{r_a} \frac{dr}{r}} = \frac{R \cdot 2 \pi L}{\ln r_a - \ln r_i} = \frac{R \cdot 2 \pi L}{\ln \left(\frac{r_a}{r_i} \right)}$$

Der spez. Widerstand und sein Temperaturkoeffizient stellen Materialkonstanten dar, welche gestatten, die verschiedenen thermoplastischen Materialien unabhängig vom Aufbau der Leiter zu charakterisieren und zu vergleichen. Die in Tabelle II zusammengestellten und in Fig. 3 und 4 graphisch

dargestellten Werte geben einen Ueberblick über den spez. Widerstand von Thermoplasten verschiedener Fabrikate und Leiterarten.

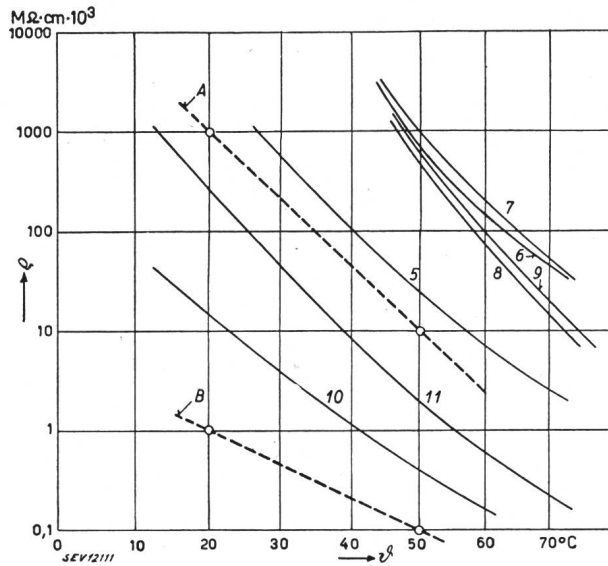


Fig. 3.

Spezifischer Widerstand (ρ) der Isolierschläuche in Funktion der Temperatur (ϑ)

A Verlangte Minimalwerte für Aderisolation.
B Verlangte Minimalwerte für Schutzschlauch-Isolation.
(Vgl. Tabelle II)

Aus den Untersuchungen an in- und ausländischen Thermoplasten, die innerhalb 2 Jahren zur Prüfung gelangten, resultiert eine zur Zeit erreichbare mittlere Qualität, die die Grundlage für die festgesetzten Minimalwerte bilden soll. Sie gelten für Leiter, die nur thermoplastische Isolation aufweisen, einschliesslich flexible Adern, die noch mit Kunstseide besponnen sind.

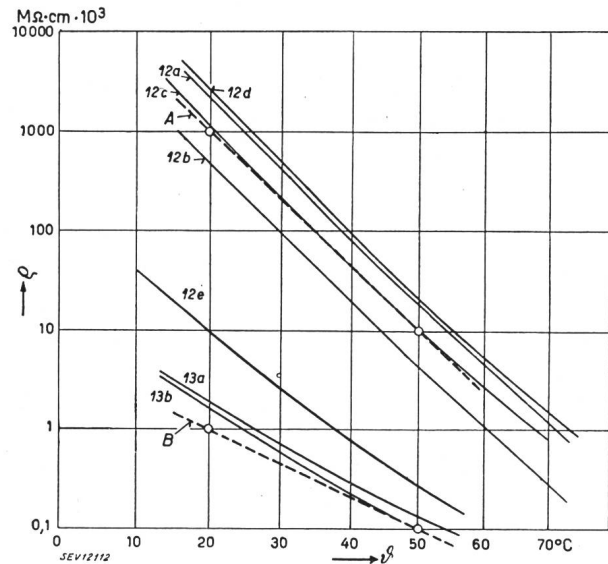


Fig. 4.

Spezifischer Widerstand (ρ) der Ader- und Schutzschläuche in Funktion der Temperatur (ϑ)

A Verlangte Minimalwerte für Aderisolation.
B Verlangte Minimalwerte für Schutzschlauch-Isolation
(Vgl. Tabelle II)

1. für Aderisolation:

spez. Widerstand
bei 20° C min: 1000 · 10³ Megohm · cm

spez. Widerstand
bei 50° C min: 10 · 10³ Megohm · cm
wobei einer der beiden Werte um maximal 25 % unterschritten werden darf.

2. für Schutzschläuche:

An die Isolationsfestigkeit der Schutzschläuche werden nur minimale Anforderungen gestellt. Die aufgeführten Werte wurden bis heute von Schutzschlauchmassen nicht unterschritten; immerhin ist auch hier die Festlegung von Minimalwerten aus sicherheitstechnischen Gründen nötig:

spez. Widerstand
bei 20° C min: 1 · 10³ Megohm · cm
spez. Widerstand
bei 50° C min: 0,1 · 10³ Megohm · cm
wobei wiederum einer dieser beiden Werte um maximal 25 % unterschritten werden darf.

Spezifischer Widerstand der Isolierschläuche in Funktion der Temperatur.

Tabelle II

Fabr.	Muster	Leiterart	Spez. Widerstand in Megohm · cm · 10 ³ bei		
			20° C	50° C	70° C
C	5	T Draht 2,5 mm ² blau	> 3000	24,8	2,72
D	6	" " 1 " rot	> 3000	685	45,2
D	7	" " 2,5 " grün	> 3000	942	50,5
B	8	TK " 3×1 " rot	> 3000	460	13,7
B	9	" " 3×1 " gelb	> 3000	585	18,7
E	10	T " 1 " blau	14,8	0,40	0,08
E	11	" " 1 " weiss	251	1,91	0,22
A	12a	TDWn " 4×2,5 " schwarz	2314	19,0	1,16
A	12b	" " 4×2,5 " blau	480	4,8	0,28
A	12c	" " 4×2,5 " rot	1100	10,3	0,81
A	12d	" " 4×2,5 " gelb	2690	20,5	1,55
A	12e	" Schutzschl.	9,95	0,27	0,15
D	13a	" 4×2,5 " grau	1,9	0,125	0,10
D	13b	" Schutzschl.	1,6	0,110	0,10

Einfluss der Alterung auf die Isolationsfestigkeit

Ueber den Einfluss der beschleunigten Alterung (10 Tage bei 70° C), sowie längerer trockener Lagerung bei Raumtemperatur (ca. 1 Jahr) wurden weitere Versuche durchgeführt, die fast ausnahmslos eine Erhöhung der Zerreiissfestigkeit, der elektrischen Festigkeit und der Schlagempfindlichkeit in der Kälte bei Abnahme der Bruchdehnung der Isoliermasse ergaben. Auch nach der 8stündigen Erwärmung im Wasser auf 70° C wurden nach Erkalten der Proben verschiedentlich höhere Isolations-Widerstände gemessen. Diese Erscheinungen sind auf das Verdampfen von Weichmachern zurückzuführen. Es wurden denn auch nach der beschleunigten Alterung Gewichtsverluste von mehr als 10 % festgestellt, ohne dass die Isolierschläuche, abgesehen von den erwähnten Veränderungen, ungünstigere Eigenschaften zeigten.

Berührungsstrom (Ableitstrom)

Die in den vorigen Abschnitten untersuchte Leitfähigkeit führt in Verbindung mit den dielektrischen Verlusten bei erhöhter Temperatur zu Berührungsströmen, die unter ungünstigen Umständen lebensgefährliche Werte erreichen können.

Da der spez. Widerstand nur berechnet werden kann, wenn ein einadriger Leiter von definierter geometrischer Form vorliegt, muss bei der Beurteilung von mehradrigen Kabeln auch der praktisch vorkommende Berührungstrom des Kabels gemessen werden.

Als Grundsatz für die Beurteilung in dieser Hinsicht wurde folgende Annahme gemacht: Beim Berühren oder Umfassen der Kabel soll im Handbereich (2 m Prüflänge) im ungünstigsten Fall, bei vollständig leitender Kabeloberfläche, keine merkliche Elektrisierung möglich sein, d. h. der Berührungstrom darf maximal 0,5 mA nicht überschreiten.

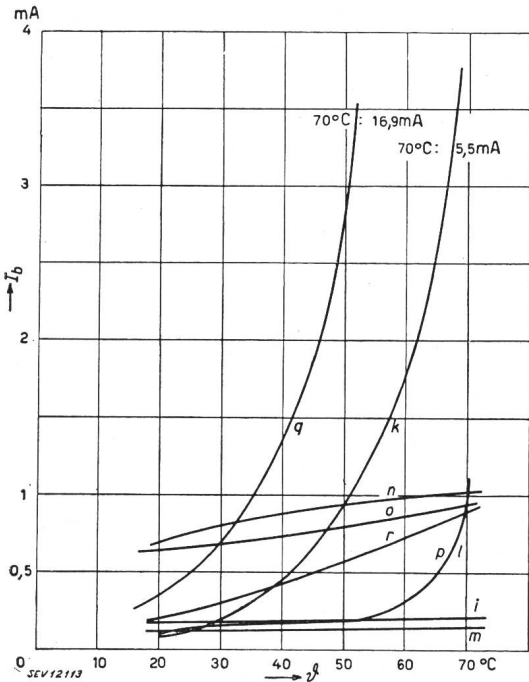


Fig. 5.

Berührungstrom (I_b) in Funktion der Temperatur (ϑ) bei 500 V, 50 Hz. (Vgl. Tabelle III)

Nach §4 der Kondensatorennormalien (Publ.170) dürfen Berührungsschutzkondensatoren, die in der Entstörungstechnik verwendet werden, keinen größeren Strom als 0,5 mA durchlassen¹⁾.

Die Messung des Berührungstromes erfolgte bei gleicher Prüfanordnung und Prüflänge wie bei der Bestimmung des Isolationswiderstandes in Funktion der Temperatur bei 500 V Wechselstrom 50 Hz zwischen sämtlichen Adern und dem Wasserbad nach 24stündiger Lagerung in Wasser von Raumtemperatur.

Als Messinstrument wird ein Milliampereometer mit Thermoumformer verwendet (Messbereich bei Vollausschlag umschaltbar von 1,2 bis 120 mA). Massgebend für die Beurteilung mehradriger Leiter in bezug auf den Berührungstrom sind die bei 50° C und bei einer Meßspannung von 300 V gemessenen Werte. Um bei mehradrigen Leitern einheitliche Verhältnisse festzulegen und sicherheits-

¹⁾ Ueber die Festlegung dieses Grenzwertes siehe: H. Bühler, Bulletin SEV, Bd. 30, 1939, Nr. 1, S. 11.

technisch den ungünstigsten Fall auszuwählen, sollen bei mehradrigen Leitern alle Adern zusammen gegen Wasser gemessen werden.

Dieser Prüfung werden vorläufig sämtliche kriegsbedingten Leiterarten unterworfen, da es sich gezeigt hat, dass auch an Kabeln mit Regeneratgummiisolation Berührungströme über 0,5 mA auftreten können.

Berührungstrom bei Wechselstrom 500 V 50 Hz in Funktion der Temperatur.

Tabelle III.

Fabr.	Muster	Leiterart	Berührungstrom in mA bei ~ 500 V, ~ Leitertemp.		
			20 ° C	50 ° C	70 ° C
E	a	GS-Draht 1 mm ²	0,10	0,14	0,14
F	b	GSU- „ 1 „	0,14	0,16	0,16
A	c	GSU- „ 1,5 „	0,16	0,20	0,22
C	d	T- „ 1 „	<0,10	0,26	1,51
G	e	T- „ 2,5 „	0,23	0,51	1,80
G	f	T- Seil 10 „	0,36	1,54	4,50
D	g	T- „ 35 „	0,72	6,40	25,3
D	h	T- „ 50 „	0,38	0,60	1,05
D	i	GDn 2x0,75 „	0,18	0,20	0,22
E	k	TDn 2x0,75 „	0,10	0,93	5,50
B	l	TDn 3x1 „	0,11	0,19	1,07
D	m	GDWn 4x10 „	0,12	0,13	0,15
A	n	GDWU 4x2,5 „	0,70	0,93	1,03
B	o	GDWU 4x2,5 „	0,64	0,80	0,95
D	p	TDWn 4x1 „	0,13	0,22	1,07
D	q	TDWn 4x2,5 „	0,34	3,00	17,0
D	r	TDWn 4x2,5 „	0,20	0,59	0,90

In Tabelle III und Fig. 5 und 6 sind Resultate dieser Messungen an Kabeln, Drähten und Seilen, die in den letzten 3 Monaten zur Annahmeprüfung eingereicht wurden, aufgeführt. Vergleichshalber

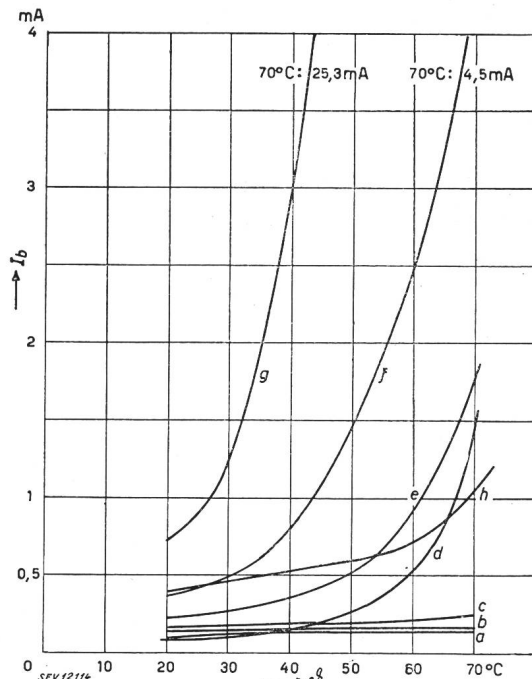


Fig. 6.

Berührungstrom (I_b) in Funktion der Temperatur (ϑ) bei 500 V, 50 Hz. (Vgl. Tabelle III)

wurden auch Vorkriegskabel, sowie GS- und GSU-Drähte mit Gummi- oder Gummiregeneratisolation untersucht. Wie die Vergleichsmessungen an Vor-

kriegsleitern mit Gummiisolation zeigen, liegt deren Berührungsstrom wesentlich unter dem festgelegten Maximalwert. Bei verschiedenen Mustern wurde gleichzeitig der Berührungsstrom und der spez. Widerstand bestimmt.

In Fig. 5 und 6 zeigen die Kurven *a, i, m*, den Verlauf des Berührungsstromes bei Gummiisolation mit der charakteristischen geringen Temperaturabhängigkeit. Bei der Verwendung von Regeneratgummi, Kurven *b, c, n, o*, wird der Berührungsstrom etwas grösser, doch bleibt der gleiche Kurvencharakter erhalten. Bei den Kurven *e, f, g, k, l, p, q, r*, liegt der spez. Widerstand unter den verlangten Minimalwerten; trotzdem wurden auf Grund der günstigen Resultate der Berührungsstrommessung mehrere Muster kriegsbedingt zugelassen. Die Kurven *d* und *h* stammen von guten thermoplastischen Materialien, deren spez. Widerstand über den verlangten Werten liegt. Die Kurven *q* und *r* zeigen Leiter von gleichem Aufbau, wobei bei beiden dieselbe elektrisch ungenügend isolierende Masse verwendet wurde. Durch Zwischenlage einer Schicht von acetylierter Baumwolle (Cotopa)

konnte der Berührungsstrom (Kurve *r*) verkleinert werden, so dass der Leiter den Anforderungen genügte. Bei den Mustern *l* und *p* konnte durch zweckmässigen Aufbau (Emaillierung oder Umwicklung der Leiterseele mit imprägniertem Papier) eine Reduktion des Berührungsstromes erreicht werden.

Durchschlagsspannung der Thermoplaste

Eine Beurteilung der elektrischen Festigkeit in Abhängigkeit der Temperatur auf Grund der Durchschlagsspannung allein befriedigt nicht, da ein typischer Wärmedurchschlag erfolgt, wobei derselbe sehr stark abhängig ist von der Spannungssteigerung und der Leistungsfähigkeit der Stromquelle. Die Masse erwärmt sich infolge zunehmender Leitfähigkeit mit steigender Temperatur bis zum Schmelzen, worauf an der meistbeanspruchten Stelle Stromdurchgang eintritt.

Um allfällige Unregelmässigkeiten und Fehler in der Fabrikation zu erfassen, wird nur die mittlere Durchschlagsspannung bei 20° C ermittelt.

Nachrichten- und Hochfrequenztechnik — Télécommunications et haute fréquence

Der Störspannungsprüfer, ein neues Messgerät der Radiostörfähigkeit elektrischer Apparate kleiner Leistung

Von *W. Gerber*, Bern.
Siehe Seite 534.

Entstehung von Klirrfaktoren durch Filter bei Amplitudenmodulation

[Nach M. Kulp, Mitteilung aus dem Telefunken-Laboratorium, in: Elektr. Nachr. Techn., Bd. 20 (1943), Nr. 11/12, S. 277...284.]

Die *Verzerrungen* der Modulation, die in Sendern, Verstärkern und Empfängern für amplitudenmodulierte Schwingungen auftreten, werden meist auf die Krümmung der Röhrencharakteristiken allein zurückgeführt. Tatsächlich erfasst man mit dieser wohlbekannten Erklärung nur einen Teil der möglichen Ursachen. Ein anderer Teil, auf den sich diese Betrachtung beschränkt, kann durch einen *bestimmten Frequenzgang des Uebertragungsmasses* (wie er unter Umständen bei Filtern vorkommen kann) bedingt sein. So genügt es bereits, wenn die Intensitäten der Komponenten im Spektrum einer amplitudenmodulierten Schwingung verschieden stark verändert werden, um eine Verzerrung der Modulation zu bewirken. Das gleiche kann auch bei zur Trägerfrequenz nicht symmetrischem Verlauf des Frequenzganges des Phasenwinkels auftreten. — Diese Behauptung erscheint zunächst nicht sehr plausibel. Bei einer Trägerschwingung (ω_0), die mit der Schwingung von der Frequenz (α) amplitudenmoduliert ist, treten bekanntlich im Spektrum ausser der Trägerfrequenz (ω_0) die beiden Seitenbänder ($\omega_0 + \alpha$) und ($\omega_0 - \alpha$) auf. Unterdrückt man nun zum Beispiel das Seitenband ($\omega_0 - \alpha$) — als Extremfall einer verschiedenen Aenderung der Komponenten —, so sollte nach obiger Behauptung die Modulation verzerrt sein, d. h. es müssten die Seitenbänder der Obertöne von α , also ($\omega_0 \pm 2\alpha$), ($\omega_0 \pm 3\alpha$), ($\omega_0 \pm 4\alpha$) etc., im Spektrum auftreten, was jedoch *nicht* der Fall ist. Die Erklärung dieses scheinbaren Widerspruches besteht darin, dass durch das Abschneiden des einen Seiten-

bandes (wie überhaupt durch jede die einzelnen Komponenten verschieden stark ändernde Uebertragung) eine *zusätzliche Frequenzmodulation* auftritt; die Spektren der Amplitudenmodulation und der zusätzlichen Frequenzmodulation sind nun derart beschaffen, dass sich alle Seitenbänder bis auf das eine ($\omega_0 + \alpha$) aufheben. In folgendem sollen diese Fragen quantitativ untersucht werden.

A. Klirrfaktoren durch spektrale Intensitätsveränderungen.

Wird eine Trägerwelle $i = I\sqrt{2} \sin \omega_0 t$ mit der Schwingung $\cos \alpha t$ amplitudenmoduliert und beträgt der Modulationsgrad μ , so wird sich die modulierte Schwingung darstellen lassen:

$$i = I\sqrt{2} \sin \omega_0 t + I\sqrt{2} \frac{\mu}{2} \{ \sin(\omega_0 + \alpha)t + \sin(\omega_0 - \alpha)t \} \quad (1)$$

(wobei der Phasenwinkel φ zwischen Trägerschwingung und Modulationsschwingung fortgelassen wurde, da dies keine Einbusse an Allgemeinheit bedeutet). Es ist hier die Intensität des Trägers und der Seitenbänder:

$$I_0 = I; \quad I_{+1} = \frac{\mu}{2} I; \quad I_{-1} = \frac{\mu}{2} I \quad (2)$$

Nun werde das tiefere Seitenband einer Intensitätsänderung unterworfen, derart, dass:

$$I_0 = I; \quad I_{+1} = \frac{\mu}{2} I; \quad I_{-1} = a \cdot \frac{\mu}{2} I \quad (3)$$

Ein Spektrum mit den Intensitäten nach Gl. (3) entspricht dem einer amplituden- und frequenzmodulierten Schwingung. Fragt man allein nach der Amplitudenmodulation, so erhält man diese zu:

$$V = \sqrt{b_0 + b_1 \cos \alpha t + b_2 \cos^2 \alpha t} \quad (4)$$

$$\text{wo: } b_0 = 1 + \frac{\mu^2}{4} (1 - a)^2; \quad b_1 = \mu (1 + a); \quad b_2 = a\mu^2 \quad (5)$$

Diese Gl. (4) ist zur Ermittlung der Klirrfaktoren nicht geeignet. Günstiger ist folgende Darstellung von V :