Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke

Band: 59 (1968)

Heft: 16

Artikel: Über das dielektrische Verhalten von Lackdrähten bei höheren Temperaturen und nach einer Langzeitlagerung in feuchter Atmosphäre

Autor: Müller, E.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-916067

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: 20.02.2026

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

BULLETIN

DES SCHWEIZERISCHEN ELEKTROTECHNISCHEN VEREINS

Gemeinsames Publikationsorgan des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins (SEV) und des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätswerke (VSE)

Über das dielektrische Verhalten von Lackdrähten bei höheren Temperaturen und nach einer Langzeitlagerung in feuchter Atmosphäre

Von *E. Müller,* Pfäffikon (ZH)

621.315.337.4

1. Einleitung

Auf die Möglichkeit, durch Messung der Dielektrizitätskonstanten und der dielektrischen Verluste von Lackdrähten Rückschlüsse auf die chemische Konstitution der Isolation, aber auch auf die Beständigkeit gegen das Eindringen von Feuchtigkeit zu ziehen, wurde schon frühzeitig hingewiesen [1][1]) und ebenso, dass die Messung des Verlustwinkels und der Kapazität in Abhängigkeit von der Temperatur ein Mittel zur Identifikation einer Lackschicht und zur Verfolgung von Alterungsvorgängen, sowie möglicherweise auch ein Verfahren zur Einordnung von Lackdrähten in Temperaturklassen darstellt [2]. Wenig später wurde es unternommen, durch Messung der Lackdehnbarkeit und der Durchschlagspannung Abbau- und Lebensdauer-Kennlinien aufzustellen [3]. In den letzten zehn Jahren sind dann zahlreiche Arbeiten erschienen, die sich mit der Frage der Lebensdauer und der Beurteilung der thermischen Beständigkeit von Isolierstoffen befassen [4; 5]. Insbesondere in den USA wurde sehr intensiv daran gearbeitet, das thermische Verhalten ganzer Isolationssysteme mit möglichst der Praxis angenäherten Vorrichtungen zu untersuchen (Motorette, Twist-, Burnout-Methode; in [6] und [7] sind hierüber zahlreiche Hinweise enthalten).

Obschon für die praktische Verwendung von Isolierstoffen der Wert einer Systemprüfung (Motorette usw.) unbestritten ist und nach wie vor die sicherste Aussagekraft besitzt, ist es unumgänglich, die Eigenschaftsprüfung der einzelnen Isolierstoffe systematisch durchzuführen, da sie allein ermöglicht, eine zweckmässige Auswahl für die Systemprüfung zu machen [8]. Deshalb scheint es unabhängig von diesen Funktionsprüfungen gerechtfertigt, die Änderungen der dielektrischen Eigenschaften des Lackdrahtes selbst unter definierten Bedingungen, wie z. B. in Abhängigkeit von der Temperatur oder nach längerer Lagerung im Feuchtraum, messtechnisch zu verfolgen. Gerade der Vergleich der mit den oben erwähnten Methoden gewonnen Ergebnisse wird zusätzlich wertvolle Rückschlüsse auf das Verhalten in der Praxis ermöglichen können.

Neben dem Isolationswiderstand, dessen Reziprokwert die «Gleichstromleitfähigkeit» liefert, dürften zweifellos die dielektrischen Verluste als Mass für die «Wechselstromleitfähigkeit» neben der Durchschlagfestigkeit als die wichtigsten elektrischen Eigenschaften anzusehen sein.

So gibt beispielsweise der Verlauf des Verlustwinkels in Abhängigkeit von der Temperatur ein Kriterium für den Übergang vom «elektrischen» zum «Wärmedurchschlag» [9]. Es mag eingewendet werden, dass bei Wicklungen irgendwelcher Art, die aus Lackdrähten bestehen, in den meisten Fällen — von Hochspannungswandlern abgesehen — die erreichten Feldstärken so klein sind, dass eine dielektrische Erwärmung und somit ein Wärmedurchschlag unwahrscheinlich ist. Die Erwärmung durch Kupfer- und Eisenverluste wird zweifellos die überragende Rolle spielen; aber der zusätzliche Anstieg der Temperatur durch die dielektrischen Verluste kann unter Umständen für den Einsatz einer Instabilität entscheidend sein [10]. Daneben ist aber bei Lackdrähten bekannt, dass die Verlustwinkelkurve in Abhängigkeit von der Temperatur bei zahlreichen Drahtlacken einen charakteristischen «Knick» zeigt [11; 12], der für die Beurteilung einer kritischen Temperaturgrenze sicherlich von Bedeutung ist.

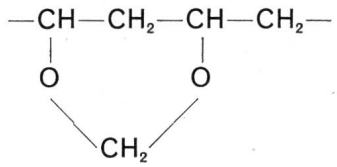
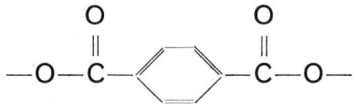
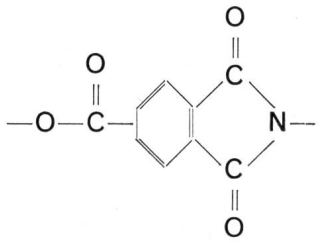
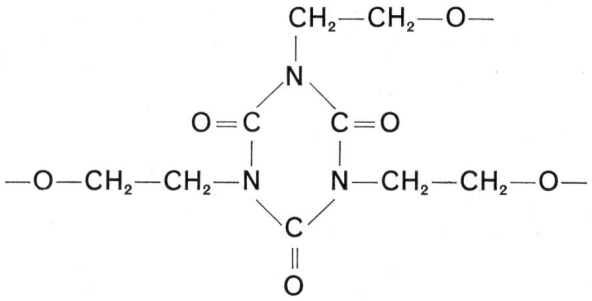
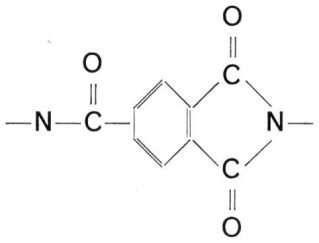
Die vorliegenden Untersuchungen wurden daher aufgenommen zunächst um festzustellen, ob etwaige Zusammenhänge zwischen diesem Knickpunkt der tg δ-Temperaturkurve und anderen, bekannten Untersuchungsmethoden bestehen, die zur Bestimmung der thermischen Einsatzgrenze angewendet werden. In diesem Falle könnten mit einer relativ einfach und schnell durchzuführenden Messung Rückschlüsse auf das Verhalten der chemisch verschieden zusammengesetzten Drahtlacke bei Wärmebeanspruchung gezogen werden.

Ein weiterer Zweck der Untersuchungen bestand in der Bestimmung des Feuchtigkeitseinflusses auf den Verlauf des Verlustwinkels und der Gleichstromleitfähigkeit, besonders im

[1]) Siehe Literatur am Schluss des Aufsatzes.

Untersuchte Isoliermaterial-Systeme

Tabelle I

Chemische Basis	Typische Strukturelemente	Besondere Charakteristik	Versuchs-nummer (LV-Nr.)
Polyvinylacetal-Phenolharze		Hohe mechanische Eigenschaften	1
Polyvinylacetal-Phenolharze Isocyanat modifiziert		Verbesserte Chemikalien-resistenz	2
Polyurethan	—O—CO—NH—	Lötfähig	3
Polyurethan Polyamid modifiziert		verbesserte mechanische Eigenschaften	4
Polyurethan Spezialpolyester		verbesserte Löt-fähigkeit	5
Polyurethan Polyvinylacetal modifiziert		verbesserte mechanische Eigenschaften	6
Polyester		wärmebeständig	7
Polyesterimid		verbesserte Wärme-beständigkeit gegenüber 7	8
Polyesterimid Cyanurat modifiziert		verbesserte Schmor-beständigkeit gegen-über 8	9
Polyamidimid		verbesserte Wärme-beständkeit gegen-über 8	10

Hinblick auf das Verhalten der neueren Drahtlackisolationen, die bekanntlich unter extremen Bedingungen einer Hydrolyse unterworfen sind.

In diesem Zusammenhang wurden die in der Tabelle I aufgeführten Systeme untersucht.

2. Die Messanordnung

Für die Messungen wurde durchwegs die achsialsymmetrische, d. h. konzentrische Form der Elektroden bevorzugt, bei der die dielektrischen Eigenschaften am besten definiert werden können.

2228-2265

Die innere Elektrode ist der Cu-Leiter selbst; als äussere Elektrode wurde anfänglich Hg[2]), später kolloidales Graphit oder Leitsilber verwendet. Die beiden letzteren haben den Vorteil, dass sich Schutzringelektroden mühelos anbringen lassen, so dass sich schematisch die in Fig. 1 wiedergegebene Anordnung ergibt. Die Messungen wurden an Proben mit 0,4 und 0,8 mm Leiterdurchmesser durchgeführt.

Grundsätzlich kann über die Vor- und Nachteile der drei Elektrodenarten folgendes gesagt werden:

Hg. Die Probenvorbereitung ist am wenigsten zeitraubend. Bei Feuchtraumlagerung sind, sofern genügend Probenmaterial zur Verfügung steht, am ehesten allfällige Einflüsse einer Langzeitlagerung festzustellen. Für Verlustwinkelmessungen

[2]) Verwendung im gebogenen Glasrohr nach VSM 23705.

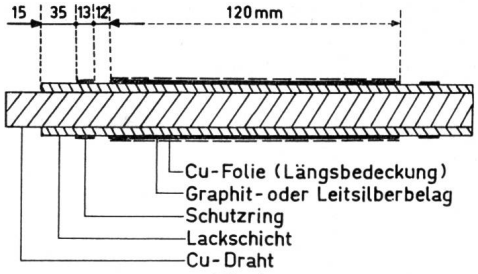


Fig. 1
Anordnung der Belegung bei dielektrischen Messungen von Lackdrähten

Verlustwinkel tg δ von Lackdrähten bei 100 Hz in Abhängigkeit von der Temperatur t

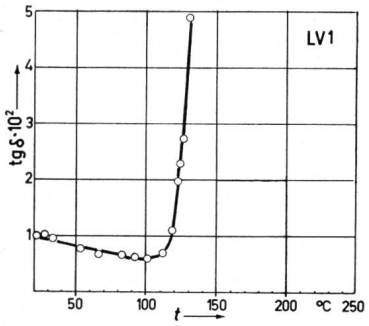


Fig. 2
Lackdrähte der Polyvinylacetal-Phenolharz-Gruppe
Versuch LV 1

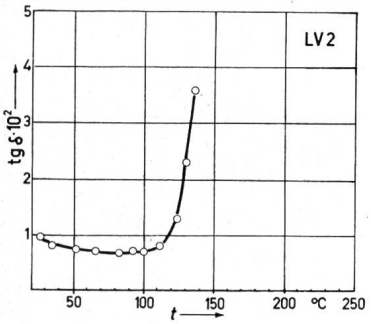


Fig. 3
Lackdrähte der Polyvinylacetal-Isocynat-Gruppe
Versuch LV 2

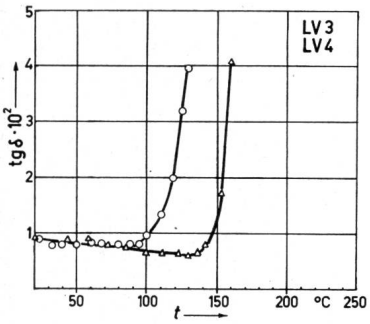


Fig. 4
Lackdrähte der Polyurethan- bzw. der Polyurethan-Polyamid-Gruppe
—o— Versuch LV 3
—Δ— Versuch LV 4

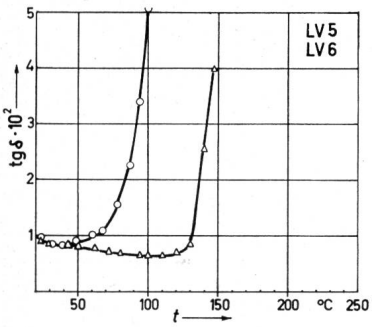


Fig. 5
Lackdrähte der Polyurethan (Spezialpolyester)- bzw. Polyurethan-Polyvinylacetal-Gruppe
—o— Versuch LV 5
—Δ— Versuch LV 6

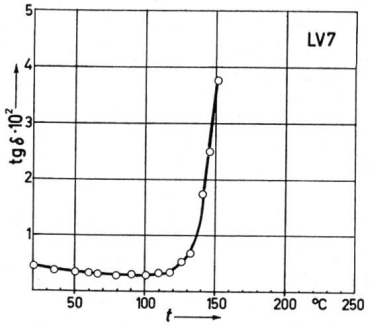


Fig. 6
Lackdrähte der Polyester-Gruppe
Versuch LV 7

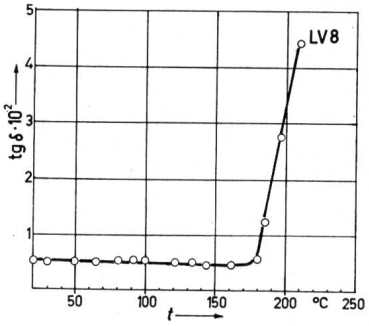


Fig. 7
Lackdrähte der Polyesterimid-Gruppe
Versuch LV 8

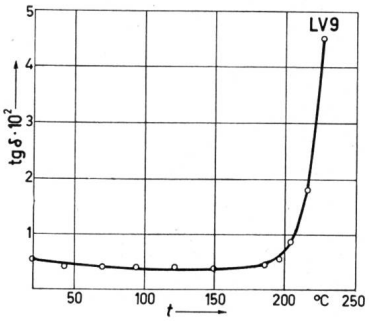


Fig. 8
Lackdrähte der Polyesterimid-(modifiziert) -Gruppe
Versuch LV 9

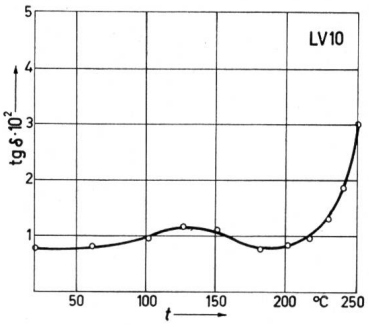


Fig. 9
Lackdrähte der Polyamidimid-Gruppe
Versuch LV 10

Temperaturabhängigkeit des Verlustwinkels tg δ bei 100 Hz nach mehrmaligem Durchlaufen des Temperaturzyklus

—×— 1. Zyklus; —△— 2. Zyklus; —○— 3. Zyklus; —□— 4. Zyklus

t Temperatur

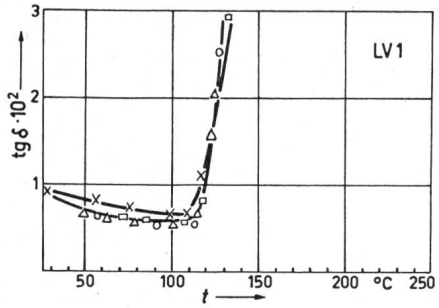


Fig. 10
Versuch LV 1

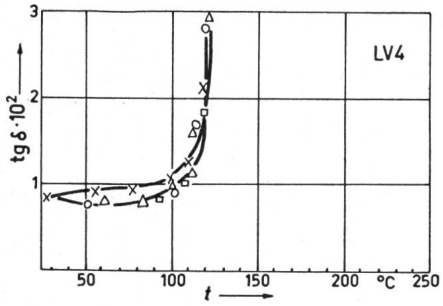


Fig. 11
Versuch LV 4

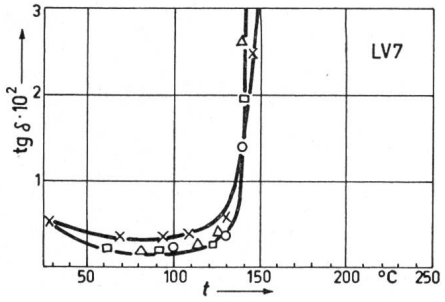


Fig. 12
Versuch LV 7

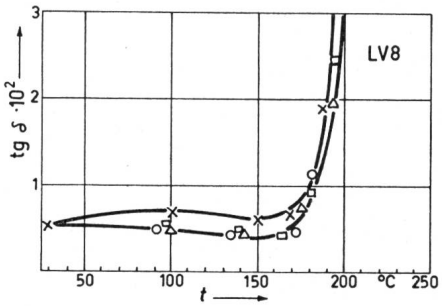


Fig. 13
Versuch LV 8

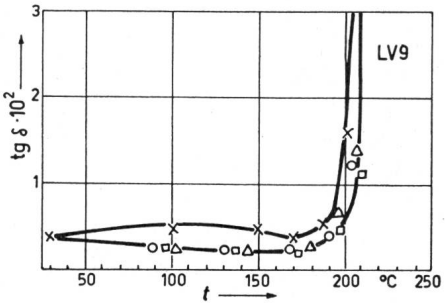


Fig. 14
Versuch LV 9

erweist sich die Neigung des Quecksilbers, rasch eine Oxydhaut zu bilden, als nachteilig für die Reproduzierbarkeit von tg δ-Werten $\leqq 1$ %. Häufige Reinigung ist erforderlich, was in Anbetracht der Giftigkeit des Hg etwas umständlich und zeitraubend ist.

Graphit. Da die verwendete wässrige kolloidale Graphit-Aufschlemmung sehr hygroskopisch und porös ist, erweist sie sich auch bei Feuchtraumlagerungen als brauchbar [2; 13]. Bei frequenzabhängigen Messungen ist wegen des relativ hohen Längswiderstandes des Graphitbelages Vorsicht geboten, bzw. zu empfehlen, die Leitfähigkeit durch Längsbedeckung mit einer Cu-Folie zu verbessern.

Leitsilber. Bei temperaturabhängigen Messungen und nicht zu hohen Frequenzen ($f < 300$ kHz) erwies sich dieser Belag als recht brauchbar. Nachteilig ist, dass er für Feuchtigkeit weniger durchlässig und daher für Feuchtraummessungen nicht so geeignet ist wie ein Graphitbelag. Es dürfte vielleicht von Interesse sein, anhand von Tabelle II zu zeigen, welche Messfehler bei Vernachlässigung der oben erwähnten Vorsichtsmassnahmen entstehen können. Man erkennt darin, dass ungereinigtes Quecksilber und ein Graphitbelag ohne zusätzliche Kupferfolie beträchtliche Messfehler ergeben können, die beim Graphitbelag schon bei 1000 Hz bereits 10 % betragen können.

Aus den obigen tg δ-Werten ergibt sich übrigens mit einem Kapazitätswert von 550 pF als zusätzlicher Serien-Widerstand

Einfluss des Elektrodenmaterials bei der Verlustwinkelmessung von Lackdrähten (tg $\delta \cdot 10^2$) Tabelle II

Elektrode \ Messfrequenz Hz	10^2	10^3	$5 \cdot 10^3$	10^4	$5 \cdot 10^4$	10^5
Hg, ungereinigt	1,15	1,41	1,90	2,08	2,67	2,38
Hg, gereinigt	0,88	0,91	1,18	1,39	2,02	2,19
Graphit ohne Cu-Folie	0,82	0,97	1,64	2,39	7,08	12,3
Graphit mit Cu-Folie	0,81	0,86	1,11	1,34	1,95	2,17
Leitsilber ohne Cu-Folie	0,84	0,88	1,14	1,37	1,97	2,19
Leitsilber mit Cu-Folie	0,84	0,88	1,14	1,36	1,96	2,17

des Graphitbelages für das Ersatzbild des verlustbehafteten Kondensators über den ganzen Frequenzbereich ein konstanter Wert von etwa 300 Ω, woraus sich die festgestellten Abweichungen mühelos erklären lassen.

3. Temperaturabhängigkeit der dielektrischen Eigenschaften

3.1 Der Verlustwinkel

Zunächst wurde der Verlustwinkel in Abhängigkeit von der Temperatur bei einer festen Frequenz von 100 Hz gemessen.

Temperaturabhängigkeit des Verlustwinkels tg δ von Lackdrähten bei verschiedenen Frequenzen

—○— 100 Hz; —△— 1 kHz; —✕— 10 kHz; —□— 100 kHz

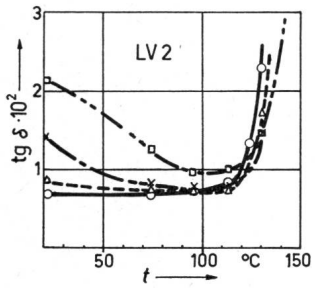


Fig. 15a
Versuch LV 2

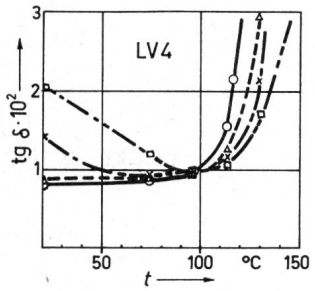


Fig. 15b
Versuch LV 4

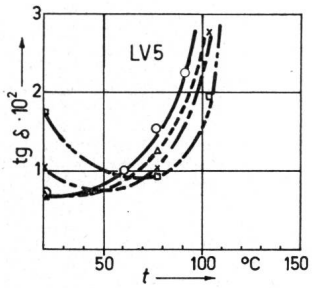


Fig. 15c
Versuch LV 5

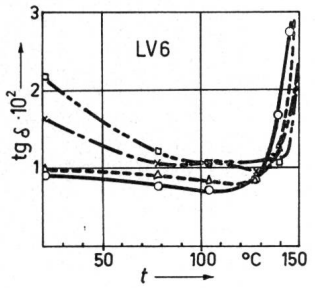


Fig. 15d
Versuch LV 6

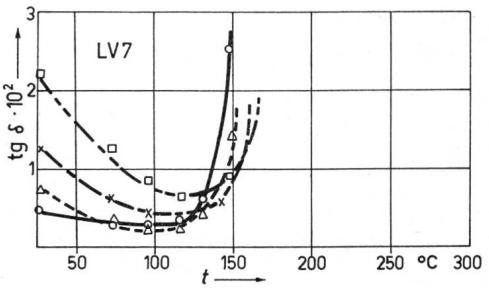


Fig. 15e
Versuch LV 7

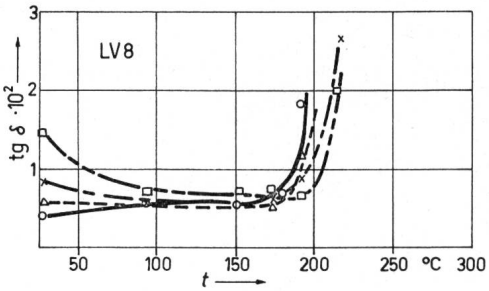


Fig. 15f
Versuch LV 8

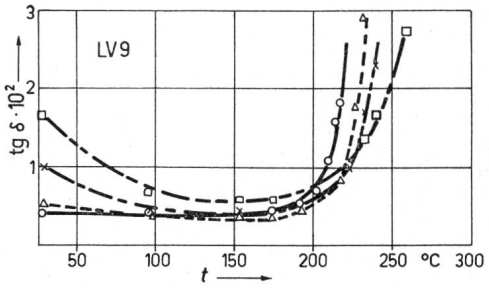


Fig. 15g
Versuch LV 9

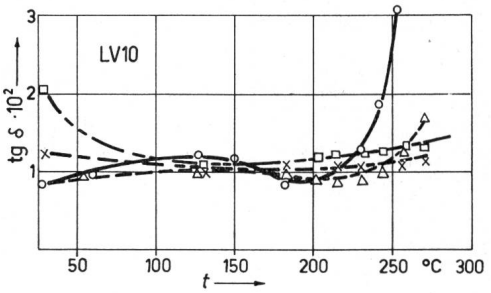


Fig. 15h
Versuch LV 10

Dieser Wert wurde aus messtechnischen Gründen möglichst nahe der Netzfrequenz (50 Hz) gewählt, weil höhere Temperaturen an Wicklungen praktisch nur bei der Netzfrequenz auftreten. Wie später gezeigt wird, spielt die Messfrequenz im Bereich von 100 Hz...100 kHz bei den hier untersuchten Lackdrähten, mit einer Ausnahme, eine untergeordnete Rolle.

Bei diesen Messungen zeigte es sich wie erwartet, dass alle untersuchten Lacksorten bei einer bestimmten Temperatur einen charakteristischen «Knick» der tg δ-Kurve aufweisen, wobei sich vor allem auch gewisse Unterschiede in den Modifikationen bei den einzelnen Lacksorten hervorheben. So sind z. B. bei den Lacken auf Polyvinylacetalbasis kleine Unterschiede der beiden Modifikationen zu erkennen (LV 1, LV 2; Fig. 2 und 3) und ausgeprägter bei den verschiedenen Lacksorten auf Polyurethanbasis (LV 3, 4, 5, 6; Fig. 4 und 5).

Ebenso verhält es sich bei den neueren Drahtlacksorten der Polyesterimid- oder Polyesteramidimidgruppe, bei denen sich eine Verschiebung des «Temperatursprunges» nach höheren Temperaturen zu, wie sie für diese Lackgruppen typisch sind, deutlich bemerkbar macht (LV 7, 8, 9, 10; Fig. 6...9).

Um abzuklären, ob oberhalb des tg δ-Knickpunktes bereits irreversible Veränderungen stattfinden, wurden die Messungen mit der gleichen Drahtprobe bei steigender und fallender Temperatur mehrmals wiederholt. Dabei stellte es sich heraus, dass die untersuchten Drahtlacksorten auch nach mehrmaligem Durchlaufen des Temperaturzyklus praktisch den gleichen Verlauf und den gleichen charakteristischen «Knickpunkt» der tg δ-Kurve zeigen (Fig. 10...14).

Es sind also offenbar innerhalb des Zeitablaufs der Zyklen keine irreversiblen Veränderungen wie z. B. Depolymerisation,

Durchschlagfeldstärke $\overline{E}$ an Lackdrähten in Abhängigkeit von der Temperatur t

—×— Gleichspannung —o— Wechselspannung (Effektivwert 50 Hz) ---- Wechselspannung (Scheitelwert)

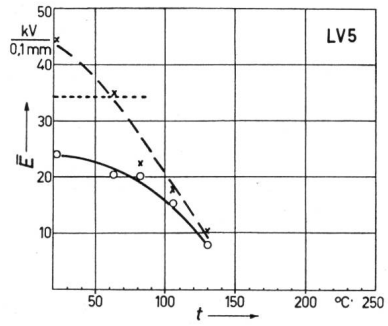


Fig. 16a
Versuch LV 5

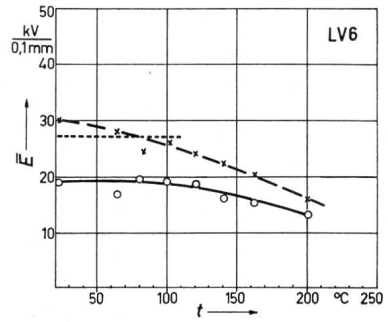


Fig. 16b
Versuch LV 6

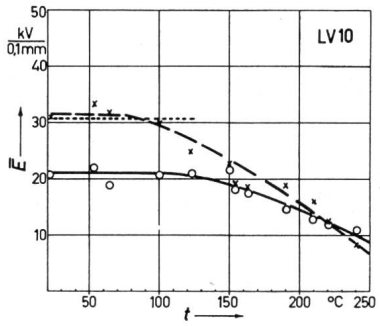


Fig. 16c
Versuch LV 10

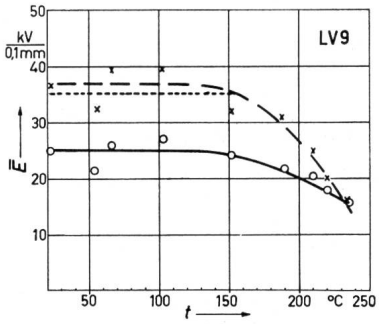


Fig. 16d
Versuch LV 9

Oxydation usw. im untersuchten Temperaturbereich aufgetreten.

Variiert man ausser der Temperatur noch die Frequenz, so ergibt sich die typische Verschiebung der Minimal- und Maximalwerte nach höheren Frequenzen (Fig. 15a...h). Dies besagt, dass neben den Ionen- auch Dipolverluste auftreten, was besonders ausgeprägt ist beim Polyamidimidlack (LV Nr. 10, Fig. 15h), wo im fraglichen Temperaturbereich bei 10 und 100 kHz nur noch ein schwaches Maximum der tg δ-Werte auftritt [14].

Dass im übrigen der Anstieg der tg δ-Werte den Beginn einer Instabilität bezüglich Durchschlagfestigkeit anzeigt, sei an einigen Beispielen dargelegt, bei denen die Durchschlagspannung aufgenommen wurde (Fig. 16a...d). Bei Zimmertemperatur stimmen Scheitelwert der Wechselspannung und Gleichspannungswert fast überein. Es liegt also hier noch annähernd «elektrischer Durchschlag» vor [9]. Mit steigender Temperatur nähert sich der Effektivwert der Wechselspannung dem Gleichspannungswert an, so dass man von einer Übergangszone zum «Wärmedurchschlag» nach *K. W. Wagner* [9] sprechen kann.

Um von der Dimension und Schichtdicke der Lackdrähte unabhängig zu werden, wurde nicht die Durchschlagspannung, sondern die dazugehörige Feldstärke nach der bekannten Beziehung zu Grunde gelegt:

$$\overline{E} = \frac{U}{r_i \ln \frac{r_a}{r_i}} \quad \text{kV/mm}$$

worin U die angelegte Spannung in kV, r_a, r_i die Masse des Lackdrahtes bedeuten.

Zur Vermeidung von Einflüssen, die sich bei höheren Temperaturen durch eine etwaige Thermoplastizität der Lackschicht durch «Wärmedruckeffekte» der Elektroden ergeben könnten, wurden sämtliche Proben nur mit einer Graphitschicht als äussere Elektrode versehen.

Vergleich der thermischen Eigenschaften von Lackdrähten nach den verschiedenen Bestimmungsmethoden

Tabelle III

Chemische Basis	Versuchs-Nr.	Grenztemperaturen in °C nach			
		tg δ-Kurve	Isolations-Widerstand	CEI-Publ. 172 (20000 h)	Erfahrungswerten der Praxis
Polyvinylacetal	LV 1	115...120	110...120	122	120...130
	LV 2	120...125	120...130	120	120...130
Polyurethan	LV 3	145...150	130...150	[1])	120
	LV 4	110	110...120	[1])	120
	LV 5	75...80	50...60	[1])	—
	LV 6	140	120...130	[1])	120
Polyester	LV 7	135...140	90...100	178	130...155
Polyestermid	LV 8	185...190	140...150	205	155...180
Polyestermid	LV 9	210...230	180...190	213	155...180
Polyamidimid	LV 10	200...230[2])	150...180	225	180...200

[1]) Wegen Aufspaltung der Urethanbindung bei Temperaturen, wie sie bei der CEI-Grenztemperaturprüfung angewendet wurden, ist diese Prüfung wenig sinnvoll.
[2]) Siehe auch Bemerkung im Text.

Aus dem Vergleich der Kurven bestätigt sich, dass zwischen den «kritischen» Werten des tg δ und dem Abfall der Durchschlags-Feldstärke mit der Temperatur ein Zusammenhang besteht.

3.2 Der Isolationswiderstand

Da die Ionenleitfähigkeit — zum mindesten bei den tiefen Frequenzen — weitgehend am Zustandekommen der dielektrischen Verluste der hier untersuchten Lackdrähte beteiligt ist, zeigen sich auch im Verhalten der Gleichstromleitfähigkeit bzw. deren Reziprokwert, dem Isolationswiderstand, gewisse Parallelen mit den dielektrischen Verlusten.

Bei den Acetallackdrähten (LV 1, LV 2) erfolgt beispielsweise der Abfall des Isolationswiderstandes bei annähernd den gleichen Temperaturen wie der Anstieg des Verlustwinkels (Fig. 17a).

Auch bei den Lackdrähten auf Polyurethanbasis (LV 3...6) sind ganz analoge Unterschiede unter den einzelnen Modifikationen festzustellen (Fig. 17b) und ebenso bei den neueren Drahtlacken der Polyester-, Polyesterimid- oder Polyamidimidgruppe (LV 7...10, Fig. 17c...d). Besonders deutlich ist auch hier wieder der Unterschied zwischen dem Versuch LV 9 (modifiziertes Polyesterimid) und LV 10 (Polyamidimid).

4. Einordnung der Ergebnisse in die Klassierung nach Temperaturgrenzen

Ordnet man die bei diesen Untersuchungen gewonnen Resultate der Verlustwinkelwerte und des Isolationswiderstandes in der Reihenfolge der kritischen Temperaturwerte (Tabelle III), so fällt auf, dass diese Werte mit den Grenztemperaturwerten nach CEI bei 20000 h recht gut übereinstimmen. Eine Ausnahme macht die Polyamidimid-Isolation (LV 10), die sich auf Grund der dielektrischen Messungen zwischen der Polyesterimid- (LV 8) und der modifizierten Polyesterimid-Isolation (LV 9) einstufen lässt, nach der Grenztemperaturbestimmung gemäss CEI aber die höchste Temperaturbeständigkeit aufweist. Diese Abweichung lässt sich mit der chemischen Konstitution des Polyamidimides erklären (weniger vernetztes Produkt als dasjenige von LV 8 und LV 9). Recht gute Übereinstimmung ist aber auch zwischen den «kritischen» Temperaturwerten der Verlustwinkelmessungen und den Erfahrungswerten der zulässigen Betriebstemperatur festzustellen mit einer gewissen Ausnahme bei den Qualitäten LV 8, LV 9 und LV 10. Dass bei diesen Qualitäten im praktischen Einsatz die Temperaturbeständigkeit, wie sie sich aus den Laboratoriumsmessungen ergeben würde, bei weitem nicht erreicht wird, kann damit erklärt werden, dass die geeigneten Imprägniermittel noch nicht oder nur mit sehr hohen Preisen erhältlich sind.

Die Untersuchungen zeigten, dass bereits kleine Unterschiede in der Lackmodifikation sich deutlich unterscheiden lassen, und dass damit die Möglichkeit besteht, rasch und mit guter Reproduzierbarkeit Lackdrähte auf ihre Eignung zu prüfen.

5. Einfluss der Langzeitlagerung in feuchter Atmosphäre

Für diejenigen Lacksorten, die hauptsächlich in der Schwachstromtechnik (Messinstrumente, Relais- und Drosselspulen, Übertrager, Schwingkreise usw.) Verwendung finden, ist das Verhalten ihrer dielektrischen Eigenschaften nach Lagerung bei hoher Luftfeuchtigkeit ebenfalls von Bedeutung, wobei für die Praxis im wesentlichen der Isolationswiderstand von Interesse ist. Anderseits stellt die Messung des Verlustwinkels

Isolationswiderstand *R* von Lackdrähten in Abhängigkeit von der Temperatur *t*

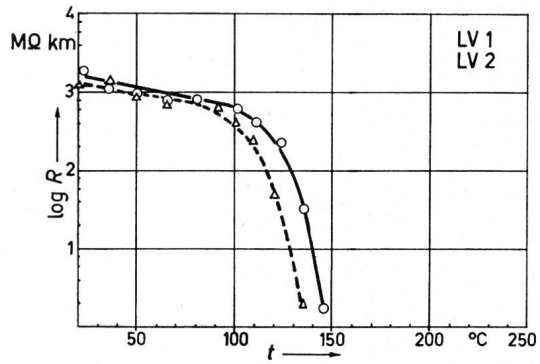


Fig. 17a
—△— Versuch LV 1 (Typ Polyvinylacetal-Phenolharz); —○— Versuch LV 2 (Typ Polyvinylacetal-Isocyanat, modifiziert)

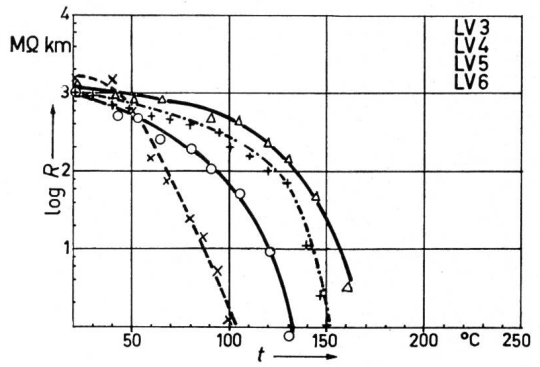


Fig. 17b
—△— Versuch LV 3 (Typ Polyurethan); —○— Versuch LV 4 (Typ Polyurethan-Polyamid, modifiziert); —×— Versuch LV 5 (Typ Polyurethan Spezialpolyester); —+— Versuch LV 6 (Typ Polyurethan Polyvinylacetal, modifiziert)

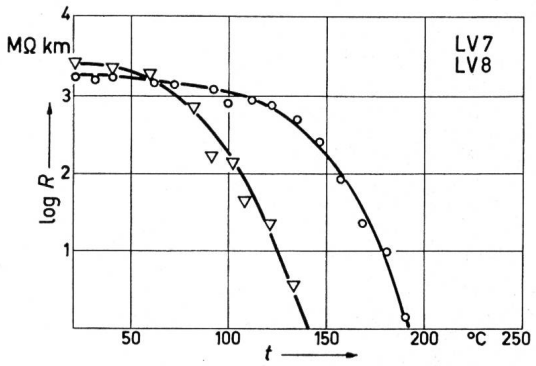


Fig. 17c
—▽— Versuch LV 7 (Typ Polyester); —○— Versuch LV 8 (Typ Polyesterimid)

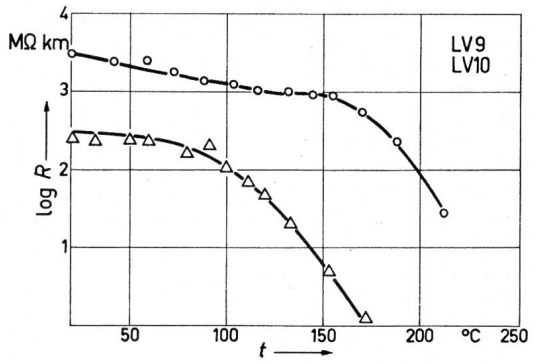


Fig. 17d
—○— Versuch LV 9 (Typ Polyesterimid Cyanurat, modifiziert); —△— Versuch LV 10 (Typ Polyamidimid)

bei Tonfrequenz ein zusätzliches, empfindliches Kriterium dar, um eine von aussen beginnende Absorption der Feuchtigkeit durch den Lackfilm zu erfassen, und zwar zum Teil schon bevor sich eine entsprechende Einwirkung auf den Isolationswiderstand bemerkbar macht.

Als Messfrequenz für den Verlustwinkel wurde 1 kHz gewählt, einmal weil sie als «Standardfrequenz» der Schwachstromtechnik im Niederfrequenzgebiet anzusehen ist, zum andern weil bei den Messungen mit der Quecksilber-Elektrode, die anfänglich parallel mit der Graphitelektrode durchgeführt wurden, kein Schutzring verwendet werden kann. Dadurch sollten die Fehlerquellen, die bei 100 Hz durch eine Feuchtigkeitshaut an den Enden entstehen können, vermieden werden. Es wurden zwar auch bei 10 und bei 100 kHz einige Kontrollmessungen durchgeführt, doch brachten diese erwartungsgemäss keine zusätzlichen Ergebnisse. Um die Anzahl der Parameter nicht noch mehr zu vergrössern, wurde deshalb auf eine Weiterverfolgung der Frequenzabhängigkeit des tg δ verzichtet. Die Konditionierung der Proben erfolgte bei 95 % relativer Feuchtigkeit bei 20 °C bzw. bei 70 °C während 900 Tagen, also fast 2½ Jahren.

Die Messergebnisse der so durchgeführten Langzeitlagerung im Feuchtraum sind vielleicht weniger durch die festgestellten relativ geringfügigen Änderungen der dielektrischen Eigenschaften, als durch diese 2½jährige Beobachtungsdauer bemerkenswert.

Aus den Diagrammen der Fig. 18...25 ergibt sich folgendes Bild:

Polyvinylacetal-Lacke (LV 1, LV 2, Fig. 18 und 20). Es ist ein Anstieg des Verlustwinkels und ein entsprechender Abfall des Isolationswiderstandes in den ersten 14 Tagen festzustellen; dann aber bleiben die Werte praktisch konstant über den ganzen restlichen Zeitraum.

Polyurethanlacke (LV 3, LV 5, LV 6, Fig. 19 und 21). Der Verlustwinkel bleibt während 2½ Jahren völlig unverändert, ebenso ändert sich auch der Isolationswiderstand praktisch im Endzustand nur sehr wenig.

Polyester-, Polyesterimid, Polyesterimid modifiziert und Polyamidimid (LV 7, LV 8, LV 9, LV 10, Fig. 22...25). Bei den Qualitäten LV 7, LV 8, LV 9 ist gleichfalls keine Veränderung des Verlustwinkels festzustellen; bei der Qualität LV 10 findet ein leichter Anstieg in den ersten 10 Tagen und dann nochmals nach 300 Tagen statt (Fig. 23). Auch beim Isolationswiderstand treten bei allen Qualitäten keine nennenswerten Änderungen auf (Fig. 24 und 25) — ausgenommen vielleicht bei der Qualität LV 8 nach ca. 300 Tagen Lagerung bei 70 °C und 95 % RF um etwa eine Zehnerpotenz. Auf diesem Niveau bleibt aber der Wert etwa weitere 400 Tage konstant.

Nach diesen Ereignissen ist die Schlussfolgerung berechtigt, dass die Polyurethane und auch die neueren wärmebeständigen Drahtlacke auf Polyester- und Polyesterimidbasis bei einer langfristigen Lagerung unter den gewählten Bedingungen (20 und 70 °C) keine nennenswerten Änderungen ihrer dielektrischen Eigenschaften zeigen. Es ist bekannt, dass bei einer Konditionierung unter verschärften Bedingungen z. B. bei 120 °C im übersättigten Wasserdampf, wie sie allenfalls in geschlossenen Systemen auftreten können, die Polyurethane, die Polyester und Polyesterimide hydrolytisch zerstört werden.

Die Veränderung der dielektrischen Eigenschaften unter diesen verschärften Bedingungen soll Gegenstand weiterer Untersuchungen sein.

6. Zusammenfassung

Es wird über Untersuchungen berichtet, die über die dielektrischen Eigenschaften der heute hauptsächlich verwendeten Drahtsorten in Abhängigkeit von der Temperatur, Frequenz und nach einer Langzeitlagerung im Feuchtraum durchgeführt wurden. Dabei zeigt sich, dass der bekannte Knickpunkt der Verlustwinkel-Temperaturkurve, der den Beginn einer elektrischen Instabilität kennzeichnet, ein gut reproduzierbares Charakteristikum für eine Klassierung der Drahtlackqualitäten darstellt, welches recht gut mit der in der Praxis bewährten Einteilung der maximal zulässigen Betriebstemperatur übereinstimmt. Die Auswirkung von Modifikationen der verschiedenen Lacksorten auf die Lage des Knickpunktes ist ebenfalls gut erfassbar. Auch die Durchschlagspannung zeigt in Abhängigkeit von der Temperatur den typischen Übergang vom elektrischen zum Wärmedurchschlag als Beginn der Instabilität.

Aus den Messungen, die nach einer Langzeitlagerung von 900 Tagen in feuchter Atmosphäre durchgeführt wurden, geht hervor, dass die Drahtlacke auf Polyurethan-, Polyester-, Polyamidimid-Basis eine bemerkenswerte Beständigkeit aufweisen. Bei verschärften Bedingungen, insbesondere bei geschlossenen Systemen, liegen grundsätzlich andere Verhältnisse vor, auf die die mitgeteilten Ergebnisse nicht übertragbar sind.

Literatur

[1] *W. Wolff* und *G. Pohler:* Über Untersuchungen an Lackdrähten der Fernmeldetechnik. Elektrische Nachrichtentechnik 18(1941), S. 156...171.

[2] *K. Potthoff* und *R. Müller:* Dielektrische Verluste von Lackdrähten. ETZ 64(1943), S. 503...507.

[3] *K. Potthoff* und *R. Vees:* Dielektrische Eigenschaften von Isolierlacken. ETZ–A 77(1956), S. 65...69.

[4] *O. Beel, O. W. Romm* und *H. Luthard:* Ein Beitrag zur Lebensdauerbestimmung von Kupferlackdrähten. ETZ–A 77(1956), S. 829...834.

[5] *T. Stahlie:* Lackdraht-Prüfung. Draht 13(1962), S. 287...292.

[6] *F. Hillebrand:* Funktionsprüfung von Isolierstoffen und Isolierstoff-Kombinationen. ETZ–A 78(1957), S. 375...377.

[7] *K. Michel:* Prüfung und Beurteilung der thermischen Beständigkeit von elektrischen Isolierstoffen und Isolationen. Bull. SEV 57(1966), S. 16...26.

[8] *I. Iglisch:* Prüfverfahren zur Bestimmung der Wärmebeständigkeit von Isolierstoffen, insbesondere von Dynamodrähten. ETZ–A 79(1958), S. 537...540.

[9] *K. W. Wagner:* Der elektrische Durchschlag von festen Isolatoren. Arch. Elektrotechn. 39(1948/49), S. 215...233.

[10] *E. Jasse:* Beitrag zur Frage des Wärmedurchschlags fester Isolatoren. Arch. Elektrotechn. 39(1948/49), S. 420...428.

[11] Prüfen des Wärmeverhaltens von Drähten mit Lackisolierung. DIN 46453 Blatt 2, 1967.

[12] *K. Schmidt, G. Neubert* und *H. M. Rombrecht:* Lackdrähte mit Isolierungen auf Imid- und Esterimidbasis. ETZ–B 15(1963), S. 603...607.

[13] *H. Suhr:* Haftelektroden für das Bestimmen elektrischer Eigenschaften von Isolierstoffen. Kunststoffe 57(1967), S. 121...124.

[14] *M. Oliphant:* Effects of Cure und Aging on Dielectric Properties of Plastics. Insulation 12(1966)8, S. 37...43 + Nr. 9, S. 42...46.

Adresse des Autors:
Dr. *E. Müller,* Zentrallaboratorium der AG R. & E. Huber, Schweiz. Kabel-, Draht- und Gummiwerke, 8330 Pfäffikon (ZH).

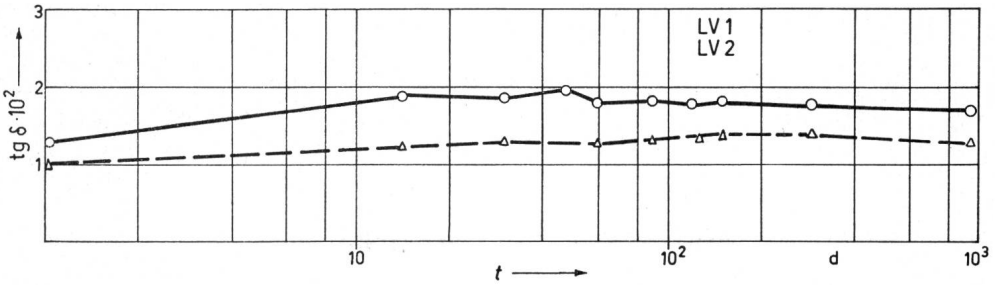


Fig. 18
Verlustwinkel tg δ von Lackdrähten der Polyvinylacetalgruppe bei 1 kHz in Abhängigkeit von einer Langzeitlagerung in feuchter Atmosphäre
—O— Versuch LV 1 bei 20 °C und 95 % relative Feuchtigkeit (RF); —Δ— Versuch LV 2 bei 20 °C und 95 % RF
t Zeit

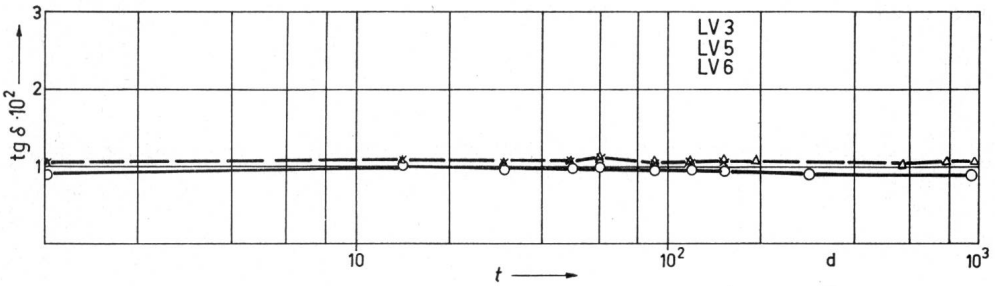


Fig. 19
Wie Fig. 18, aber für die Polyurethangruppe
—Δ— Versuch LV 3 bei 70 °C und 95 % relative Feuchtigkeit (RF); —O— Versuch LV 5 bei 20 °C und 95 % RF; —✕— Versuch LV 6 bei 20 °C und 95 % RF
t Zeit

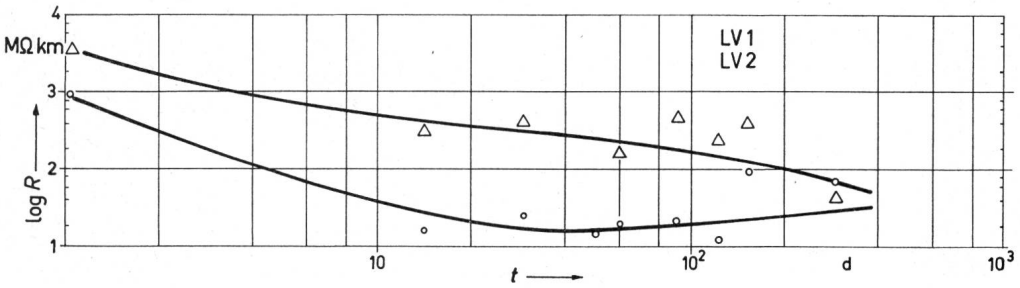


Fig. 20
Isolationswiderstand von Acetallackdrähten in Abhängigkeit von einer Langzeitlagerung in feuchter Atmosphäre
—O— Versuch LV 1 bei 20 °C und 95 % relative Luftfeuchtigkeit (RF); —Δ— Versuch LV 2 bei 20 °C und 95 % RF

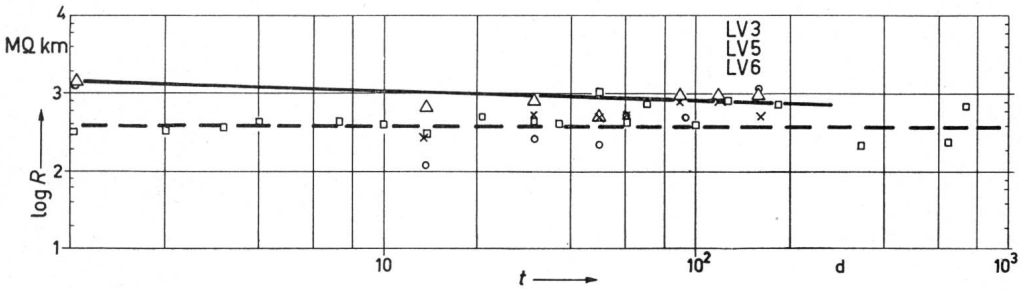


Fig. 21
Wie Fig. 20, aber für Polyurethanlackdrähte
—Δ— Versuch LV 3 bei 20 °C und 95 % relative Luftfeuchtigkeit (RF); —□— Versuch LV 3 bei 70 °C und 95 % RF; —O— Versuch LV 5 bei 20 °C und 95 % RF; —✕— Versuch LV 6 bei 20 °C und 95 % RF
t Zeit

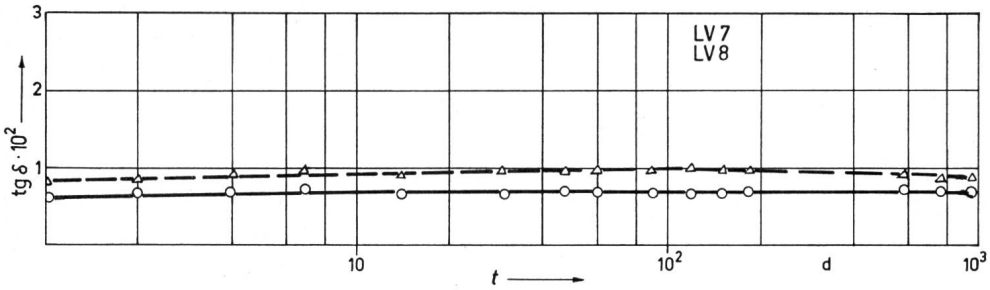


Fig. 22
Verlustwinkel von Lackdrähten der Polyester- bzw. Polyesterimidgruppe bei 1 kHz in Abhängigkeit von einer Langzeitlagerung in feuchter Atmosphäre
—△— Versuch LV 7 bei 70 °C und 95 % relative Feuchtigkeit (RF); —○— Versuch LV 8 bei 70 °C und 95 % RF
t Zeit

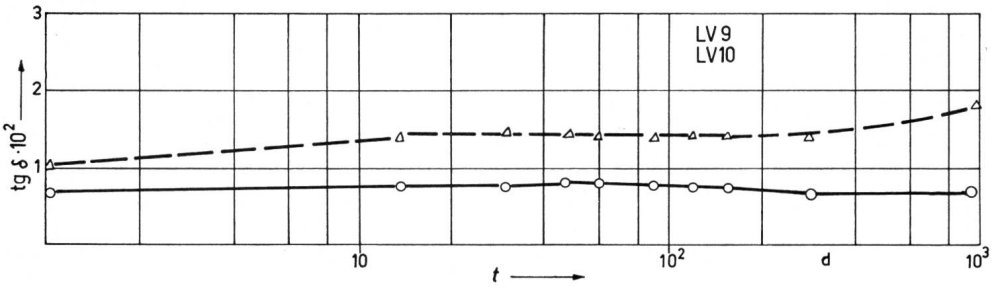


Fig. 23
Wie Fig. 22, aber für Lackdrähte der Polyesterimid (modifiziert)- bzw. Polyamidimidgruppe
—○— Versuch LV 9 bei 20 °C und 95 % relativer Feuchtigkeit (RF); —△— Versuch LV 10 bei 20 °C und 95 % RF

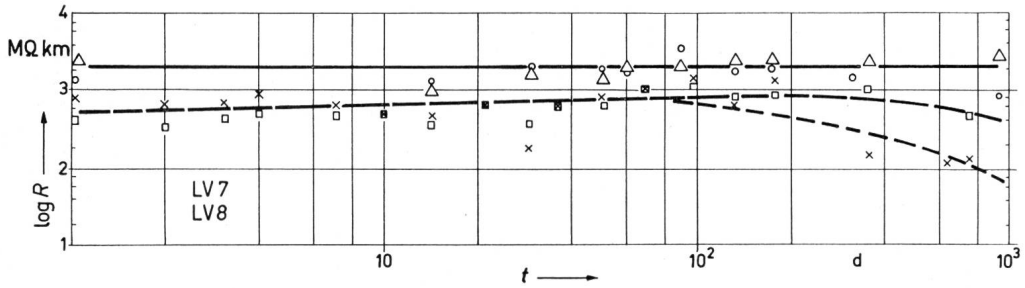


Fig. 24
Isolationswiderstand von Lackdrähten der Polyester- und Polyesterimidgruppe in Abhängigkeit von einer Langzeitlagerung in feuchter Atmosphäre
—△— Versuch LV 7 bei 20 °C und 95 % relative Feuchtigkeit (RF); —□— Versuch LV 7 bei 70 °C und 95 % RF; —○— Versuch LV 8 bei 20 °C und 95 % RF; —✕— Versuch LV 8 bei 70 °C und 95 % RF
t Zeit

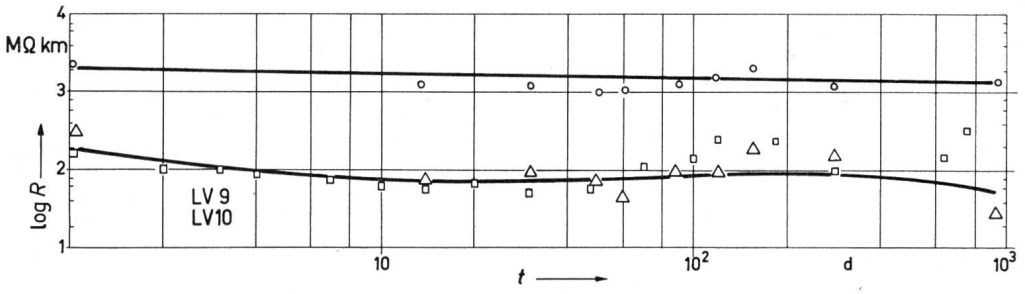


Fig. 25
Wie Fig. 24, aber für Polyesterimid- (modifiziert) und Polyamidimidgruppe
—○— Versuch LV 9 bei 20 °C und 95 % relative Feuchtigkeit (RF); —△— Versuch LV 10 bei 20 °C und 95 % relative Feuchtigkeit; —□— Versuch LV 10 bei 70 °C und 95 % RF