

Zeitschrift: Helvetica Physica Acta
Band: 12 (1939)
Heft: IV

Artikel: Physikalische Probleme technischer Isolierstoffe
Autor: Goldschmidt, R.
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-110941>

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: 15.03.2025

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

Physikalische Probleme technischer Isolierstoffe

von R. Goldschmidt, Lausanne.

(Mitteilung aus dem Laboratorium der S.A. des Câbleries et Tréfileries,
Cossonay-Gare)¹).

(23. V. 39.)

Um die technische Verwendbarkeit eines Isolierstoffes zu charakterisieren, reicht es nicht aus, nur seine dielektrische Festigkeit zu kennen, sondern in grossen technischen Anwendungsgebieten (Kabel-, Spulen- und Kondensatorbau) ist die Kenntnis der Dielektrizitätskonstanten, der dielektrischen Verluste und des Isolationswiderstandes von nicht minderer Bedeutung. Aber diese dielektrischen Daten allein genügen auch noch nicht, um über die Eignung eines Isoliermaterials für bestimmte technische Zwecke zu entscheiden, sondern es müssen auch die physikalischen und chemischen Eigenschaften mit in Betracht gezogen werden.

Es soll im Folgenden an einigen Beispielen gezeigt werden, von welchen Erwägungen man bei der Prüfung und Bewertung von technischen Isolierstoffen ausgehen muss, welche Untersuchungsmethoden anzuwenden sind und wie sich die Isolierstoffe bei Variation verschiedener Parameter im allgemeinen verhalten. Die Betrachtungen werden sich auf harz-, wachs- und paraffinartige Isolierstoffe beschränken, also auf Massen, die schon bei etwa 100° C oder weniger erweichen oder flüssig werden. Die mit der Änderung des Aggregatzustandes verbundenen Änderungen der dielektrischen Eigenschaften verdienen dabei besonderes Interesse.

Um Missverständnisse zu vermeiden, die sich leicht ergeben können, wenn es sich um Untersuchungen handelt, die an der Grenze zwischen Physik und Technik liegen, sollen zuerst die zu untersuchenden Grössen definiert werden:

Als Dielektrizitätskonstante gilt die Zahl, die angibt wieviel mal grösser die Kapazität eines mit dem zu untersuchenden Körper gefüllten Kondensators gegenüber der Kapazität des gleichen Kondensators bei Luft als Dielektrikum ist. Dabei ist dafür Sorge zu tragen, dass keine elektrischen Streufelder bestehen, sowie dass keine Fehler durch Abstützelemente der Kon-

¹) Vortrag, gehalten auf der Physikertagung in Brugg am 6. Mai 1939.

densatorelektroden bewirkt werden. Die technisch praktische und physikalisch einwandfreie Lösung ist der Schutzringkondensator.

Als Mass für die Verluste gilt der Tangens des Verlustwinkels, d. h. das Verhältnis der Verlustenergie zur Blindenergie oder des Verlustwiderstandes zum Blindwiderstand (Ersatzschema: Serienschaltung) bzw. der Ableitung zum kapazitiven Leitwert (Ersatzschema: Parallelschaltung). Die drei Definitionen sind jedoch nur identisch, solange der Verlustwinkel klein ist, wobei denn auch der Tangens dem Winkel gleichgesetzt werden kann.

Der Isolationswiderstand wird mit Gleichstrom bestimmt, im Gegensatz zu den vorgenannten Werten, die aus Wechselstrommessungen gewonnen werden. Man unterscheidet zwischen Durchgangs- und Oberflächenwiderstand. Letzterer ist im wesentlichen durch die betrieblichen und atmosphärischen Umstände bedingt. Im Folgenden handelt es sich stets um den Durchgangswiderstand.

Die genannten Grössen sind stark von der Temperatur abhängig, die bei Wechselstrom gemessenen Werte hängen ausserdem noch von der Frequenz ab. Die Abhängigkeit von der Spannung ist dagegen nur gering, solange man genügend weit von der Durchschlagsfeldstärke entfernt ist.

Hiermit wären die dielektrischen Eigenschaften definiert. Bevor nun die wichtigsten in Betracht kommenden physikalisch-chemischen Eigenschaften angeführt werden, sei kurz auf die Vorstellungen eingegangen, die man sich heute über den Mechanismus der Polarisation eines Dielektrikums macht. Es kann hier natürlich keine eingehende theoretische Behandlung dieser Frage vorgenommen werden. Es soll nur darauf hingewiesen werden, dass man zwischen Stoffen unterscheidet, die sich unter dem Einfluss des elektrischen Feldes polarisieren, wobei diese Polarisation verlustfrei erfolgt, und solchen, die bereits ohne äusseres Feld elektrische Dipole bilden. Die Dipolvektoren dieser polarisierten Molekel sind bei Abwesenheit elektrischer Felder gleichmässig auf alle Richtungen des Raumes verteilt und drehen sich erst unter dem Einfluss des angelegten Feldes in die Richtung desselben, wobei diese Drehbewegung mit Verlusten behaftet ist. Das Problem der polaren Molekel hat zu einer grossen Zahl von theoretischen und praktischen Arbeiten angeregt und viele sehr interessante Ergebnisse gezeitigt, sodass man auf diesem Gebiet über ein reiches Untersuchungsmaterial verfügt. Immerhin hat eine für die Praxis gerade bedeutungsvolle Frage bis heute noch nicht eindeutig geklärt werden können. Bekanntlich ergibt sich für die Dipoldielektrika ein eigenartiger und sehr charakteristischer Verlauf von Dielektrizitätskonstante und Verlustwinkel in Abhängig-

keit von Frequenz und Temperatur. Die Dielektrizitätskonstante nimmt in einem bestimmten Frequenzbereich ziemlich schnell ab, da der Dipol den schnellen Feldänderungen nicht mehr folgen kann, gleichzeitig hat der Verlustwinkel ein Maximum, da bei niederen Frequenzen die Dipolbewegung fast verlustlos erfolgt und bei hohen Frequenzen überhaupt keine Drehbewegung mehr stattfindet. Nun findet man aber für Mischkörperdielektrika genau die gleichen Merkmale wie für Dipolelektrika, d. h. die funktionellen Beziehungen für ϵ und $\operatorname{tg} \delta$ in Abhängigkeit von Temperatur und Frequenz sind die gleichen, sodass man nur unter Hinzuziehung anderer physikalischer Beobachtungen von Fall zu Fall entscheiden kann, ob es sich um den einen oder andern Effekt handelt. Und gerade bei den vielverwendeten Naturharzen und anderen Kohlenwasserstoffen, deren chemische Konstitution nicht genügend bekannt ist, ist es sehr schwer, wenn nicht unmöglich, eine eindeutige Entscheidung zu treffen.

Ausser den Dipolverlusten treten nun noch Verluste auf, die durch die in allen Isolierstoffen stets vorhandenen freien Ionen bedingt sind. Diese Leitfähigkeitsverluste sind umso grösser, je mehr freie Ionen pro Volumeneinheit vorhanden sind, und umso leichter dieselben sich bewegen können, d. h. umso dünnflüssiger die Masse ist.

Aber nicht nur mit Rücksicht auf die Ionenleitfähigkeit, sondern auch für das mechanische Verhalten der Masse ist die Viskosität und daneben die Haftfähigkeit von wesentlicher Bedeutung für die Güte und Verwendbarkeit eines Isolierstoffes. Isoliermassen dürfen nicht zu weich sein, um nicht zu fließen, und nicht zu hart, um nicht zu zerspringen. Sie sollen an den zu isolierenden Metallteilen gut haften und mit der Temperatur ihr Volumen möglichst wenig ändern, um Riss- und Lunkerbildungen zu vermeiden, da durch solche Hohlstellen leicht Feuchtigkeit eindringen und die dielektrischen Eigenschaften verschlechtern kann. Ist doch zu bedenken, dass Wasser bzw. Wasserdampf eine Dielektrizitätskonstante von etwa 80 und einen ausserordentlich schlechten Verlustwinkel besitzt.

Die allgemeinen Prüfregeln für Isolierstoffe betreffen dann noch die Bestimmung der Entflammbarkeit, des Abdampfverlustes, sowie die chemische Bestimmung des Gehaltes an Pechen, wasserlöslichen Salzen, Säuren und Basen.

Es sollen nun an einigen Beispielen die vorgenannten Phänomene erläutert werden. Es handelt sich dabei um Untersuchungen, die wir im Laboratorium der Câbleries et Tréfileries Cossonay-Gare durchgeführt haben. Zuerst sei einiges über Gemische von Kolo-

phonium mit Paraffin, Ozokerit oder Öl berichtet. Es sei kurz erwähnt, dass als Ozokerit (manchmal auch als Ceresin) ein höherwertiges Paraffin bezeichnet wird, das als schwarzes Erdwachs ge-

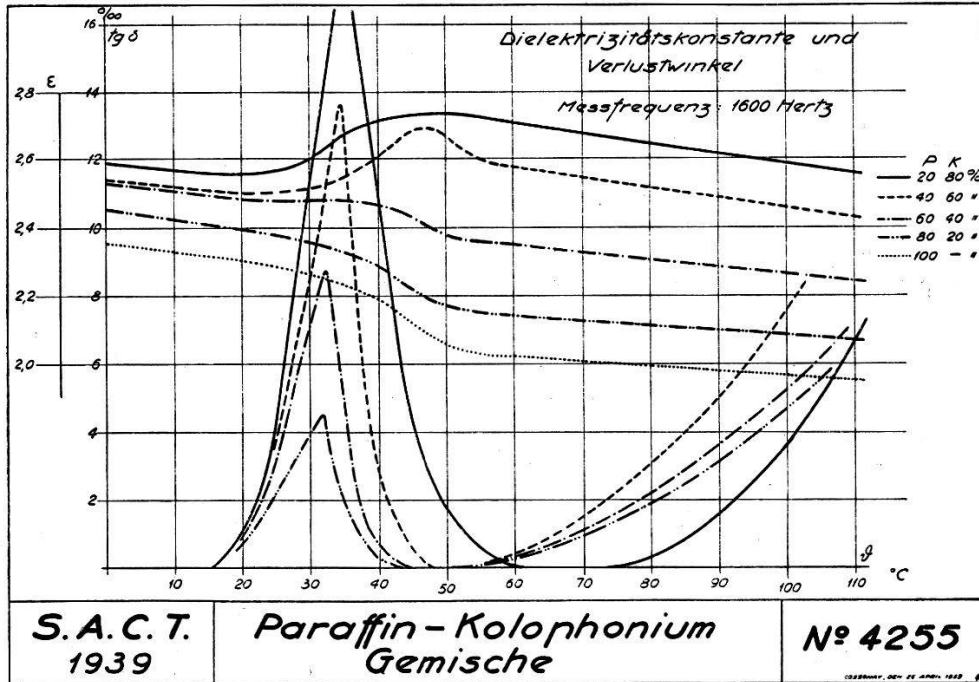


Fig. 1.

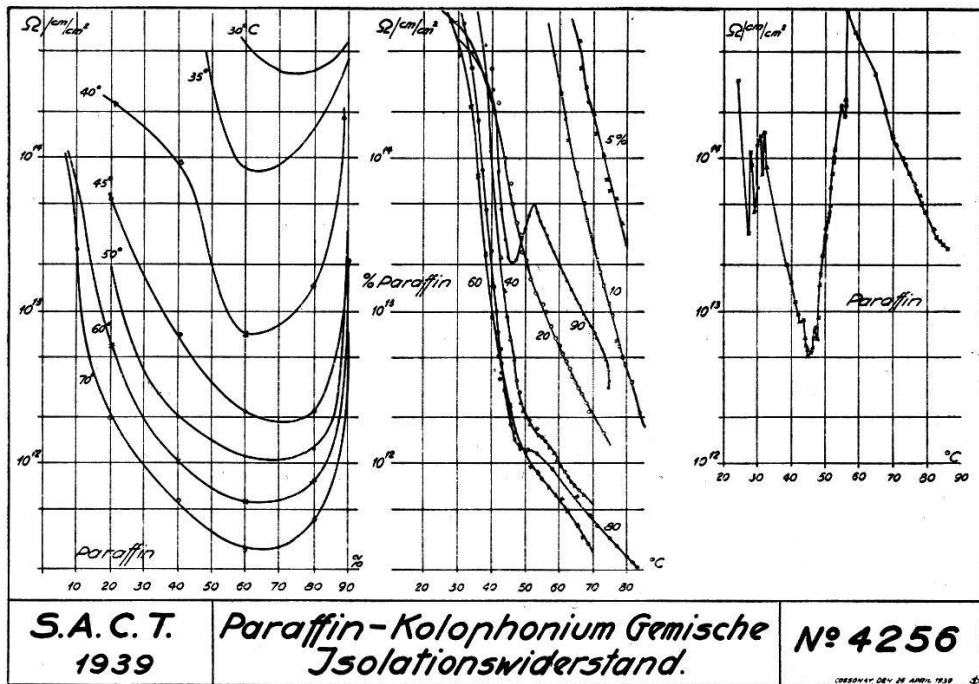


Fig. 1a.

wonnen, durch Raffination gereinigt, in verschiedenen Formen im Handel erhältlich ist.

Fig. 1 zeigt den Verlauf von Dielektrizitätskonstante und Verlustwinkel von Paraffin-Kolophoniumgemischen in Abhängig-

keit von der Temperatur. Das typische Verlustmaximum des Kolophoniums verschwindet immer mehr bei steigendem Paraffin-gehalt der Masse. Gleichzeitig geht die im gleichen Temperatur-gebiet auftretende plötzliche Zunahme der Dielektrizitätskon-stanten in einen starken Abfall über. Während die Zunahme der Dielektrizitätskonstanten auf Grund der Dipol- oder Mischkörper-effekte erklärt werden kann, mangelt eine zuverlässige Deutung für die Abnahme beim Paraffin. Es muss sich hier um Effekte handeln, die durch die Kristallisation des Materials beim Erstarren bedingt sind. Es sei noch darauf hingewiesen, dass bei geeigneten Mischun- gen die entgegengerichteten Änderungen sich im wesentlichen

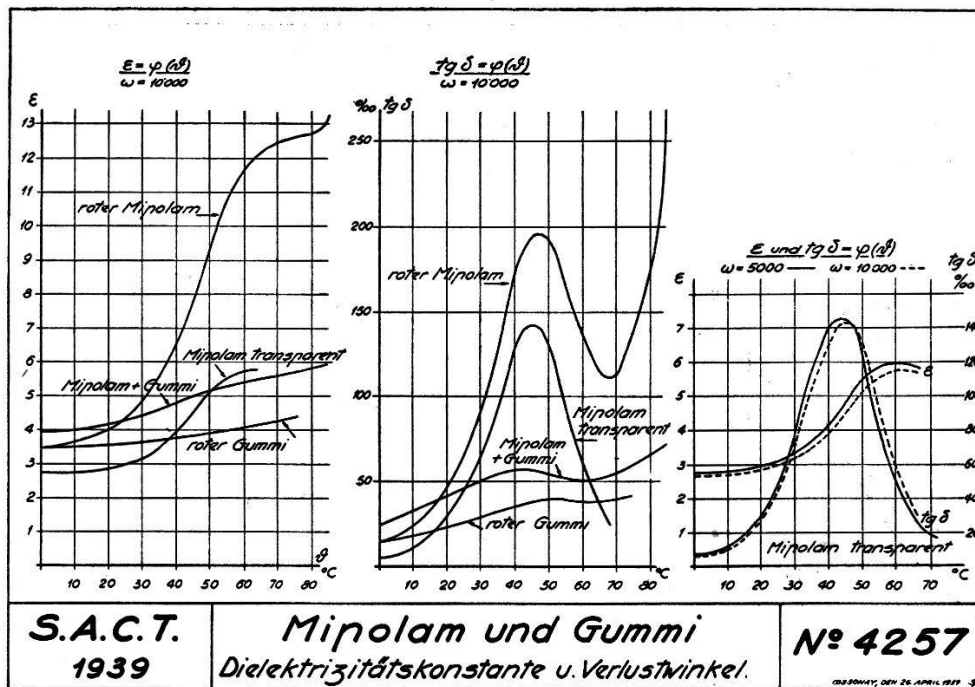


Fig. 2.

kompensieren. Man hat dann ein Material, das keine Anomalie der Dielektrizitätskonstanten zeigt, aber ein Maximum der Verluste aufweist.

Fig. 2 zeigt nun ein besonders ausgeprägtes Beispiel solcher Dispersionseffekte. Es handelt sich um den Kunststoff Mipolam. Man findet hier Verlustmaxima bis 200 v. t., begleitet von Änderungen der Dielektrizitätskonstanten von 3 auf 12. Es lässt sich leicht vorstellen, welche unangenehmen Überraschungen ein solches Verhalten für den Techniker mit sich bringen kann, und wie wichtig es ist, die diesbezüglichen Zusammenhänge genau zu prüfen und zu kennen. Zum Vergleich sind dann noch Messungen an Gummi angeführt.

Kommen wir nun auf die Paraffin-Kolophoniumgemische zurück, so zeigt Fig. 1a das Verhalten des Isolationswiderstandes.

*

Die Gemische beider Stoffe sind besser leitend als dem proportionalen Anteilverhältnis entspricht. Ein Minimum liegt bei etwa $\frac{1}{3}$ Volumengehalt an Kolophonium. Dieses Minimum ist ein typisches Zeichen von Ionenleitfähigkeit. Bei Elektronenleitfähigkeit, also bei Metallegierungen, sind die Verhältnisse ja gerade umgekehrt — die Leitfähigkeit ist geringer als dem Mischungsverhältnis entspricht.

Während in Fig. 1a das erste Diagramm den Isolationswiderstand in Abhängigkeit vom Mischungsverhältnis zeigt, wobei die Temperatur Parameter ist, ist beim zweiten Diagramm die Temperatur Abscisse und das Mischungsverhältnis Parameter.

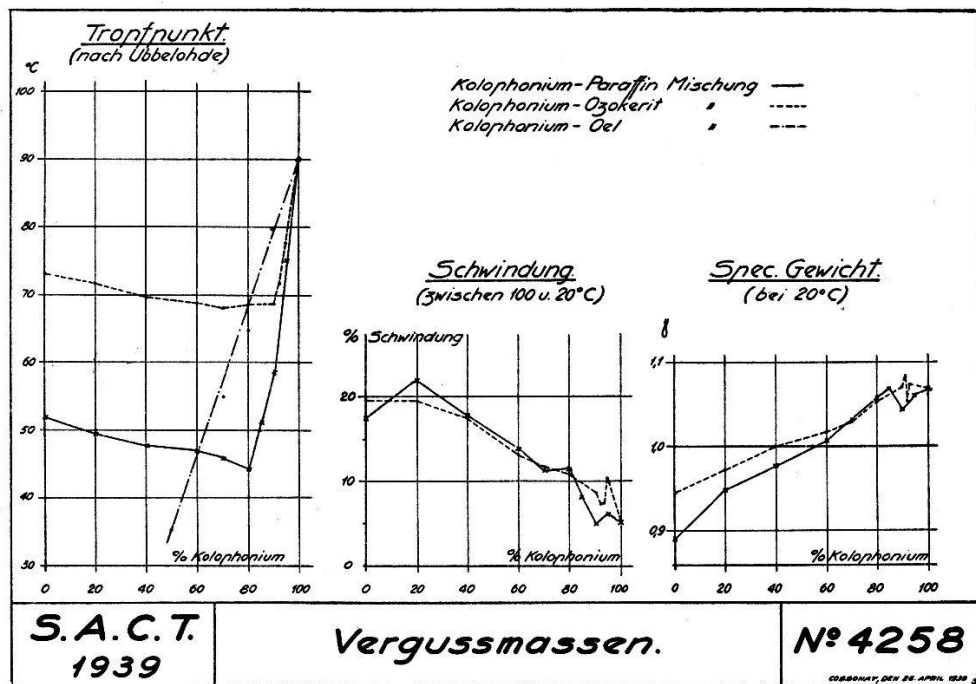


Fig. 3.

Interessant ist hier die Anomalie bei der Masse mit 90% Paraffin und ausgeprägter das Verhalten des reinen Paraffins (3. Diagramm). Es zeigt sich hier etwa 10 Grad unter dem Erstarrungspunkt ein plötzlicher starker Abfall des Isolationswiderstandes. Dieser Effekt ist auch schon von JACKSON beobachtet worden. Die Deutung der Erscheinung ist nicht ohne weiteres möglich. Es läge nahe, die Änderung der Dielektrizitätskonstanten, wie sie in Fig. 1 ersichtlich ist, als Ursache des Effekts anzusehen. Jedoch zeigt eine Nachrechnung, dass dieser Einfluss einige Größenordnungen zu klein ist. Es muss sich wahrscheinlich um Effekte handeln, die mit der Kristallisation oder Umkristallisation des Materials verbunden sind. Es ist dabei darauf hinzuweisen, dass der Effekt nur auftritt, wenn Paraffin unter Einfluss eines elektri-

schen Feldes erstarrt. Bei unseren Versuchen betrug die angelegte Feldstärke etwa 1 bis 2 kV/cm. Der Effekt verschwindet mit der Zeit. Immerhin muss auch bei der technischen Prüfung solcher Massen auf diese Erscheinung geachtet werden, um Trugschlüsse zu vermeiden.

Die Kurven der Fig. 3 beziehen sich nun noch auf einige physikalische Eigenschaften dieser Masse. Der Tropfpunkt zeigt bei 20% Paraffin oder 10% Ozokerit im Kollophonium ein ausgesprochenes, quasi-eutektisches Minimum. Eine solche harzartig hart erscheinende Masse wird also leichter flüssig als das reine Paraffin. — Die technisch wichtige Schwindung ändert sich fast

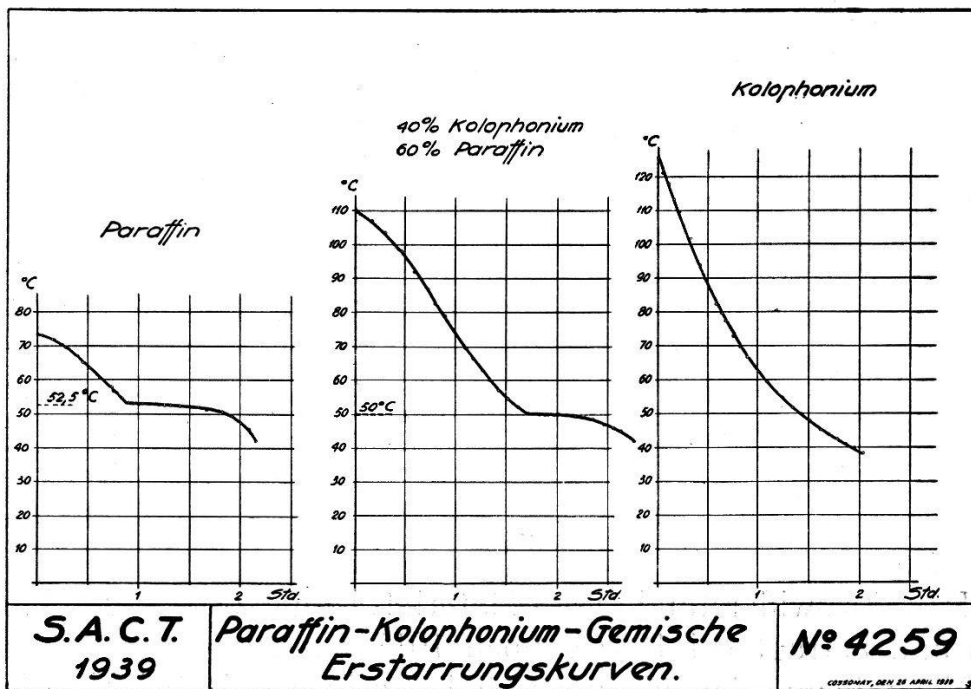


Fig. 4.

linear mit dem Mischungsverhältnis. Das gleiche gilt für das spezifische Gewicht, wobei die Dichte für Paraffin unter, für Kolophonium über der des Wassers liegt. Dies ermöglicht eine schnelle Prüfung unbekannter Mischungen auf ihren ungefähren Gehalt, an dem einen oder anderen Element.

Aus Fig. 4 ist zu ersehen, in wie unterschiedlicher Weise sich Paraffin und Kolophonium beim Erstarren verhalten. Paraffin erstarrt kristallin mit einem Haltepunkt bei 52,5° C, während Kolophonium amorph erstarrt. Eine Mischung von 40% Kolophonium mit 60% Paraffin hat beim Erstarren einen Haltepunkt, der bei 50° C, also niedriger als der des Paraffins liegt, in Übereinstimmung mit dem Befund bezüglich des Tropfpunktes.

Zum Schluss noch eine kurze Bemerkung über das Cibanit, ein Pressmaterial auf Anilinharzbasis, das über eine Reihe sehr

günstiger Eigenschaften verfügt und uns als Schweizer Produkt auch besonders interessieren muss. Es wurden von diesem Material in weitem Frequenzbereich Dielektrizitätskonstante und Verlustwinkel bestimmt. Erstere sinkt langsam mit der Frequenz ab; der Verlustwinkel hat ein sehr breites Maximum. Es dürften Dipoleffekte vorliegen, wobei eine erhebliche Streuung der Dipolkonstanten, d. h. der Art und Grösse des Dipols bestehen muss.

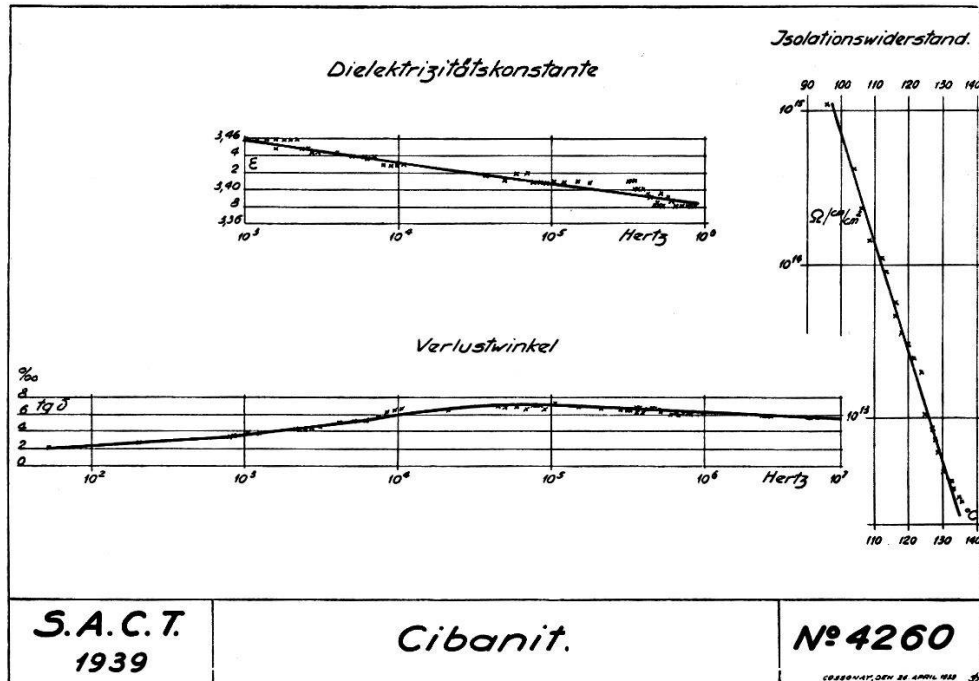


Fig. 5.

Der Isolationswiderstand dieses Materials ist ganz aussergewöhnlich hoch und beträgt bei 100° C noch 10^{15} Ohm.

Vorstehende Ausführungen sollen zeigen, wie bei Verfolgung einiger weniger Grundprinzipien sich Prüfung, Bewertung und Auswahl geeigneter Isolierstoffe mit einfachen Prüfmitteln in Industrielaboratorien durchführen lassen.

Literatur.

- SCHERING, H. Die Isolierstoffe der Elektrotechnik; Berlin 1924.
 GEMANT, A. Elektrophysik der Isolierstoffe, Berlin 1930.
 VIEWEG, R. Elektrotechnische Isolierstoffe, Berlin 1937.
 MURPHY, E. I. and MORGAN, S. A. The Dielectric Properties of Insulating Materials-
 Bell System Techn. Journ. XVI (1937) S. 493; XVII (1938) S. 640.
 WHITEHEAD, I. B. Lectures on Dielectric Theory and Insulation Mc Graw Hill
 (1927).
 DEBYE, P. Polare Molekel, Leipzig 1929.
 JACKSON, W. Trans. Far. Soc. Bd. 31 (1935) S. 827. Nature, London, Bd. 133
 (1934) S. 647. Proc. Roy. Soc. London, Bd. 150 (1935) S. 197.