

Prüfung und Beurteilung der thermischen Beständigkeit von elektrischen Isolierstoffen und Isolationen

Autor(en): **Michel, K.**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins : gemeinsames Publikationsorgan des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins (SEV) und des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätswerke (VSE)**

Band (Jahr): **57 (1966)**

Heft 1

PDF erstellt am: **15.08.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-916554>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern. Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Literatur

- [1] L. B. Loeb: Static Electrification. Berlin/Göttingen/Heidelberg, Springer 1958.
- [2] Richtlinien zur Verhütung von Gefahren durch elektrostatische Aufladungen. Merkblätter der Berufsgenossenschaften der chemischen Industrie. Weinheim/Bergstrasse, Verlag Chemie 1964.
- [3] A. Klinkenberg und V. L. Van der Minne: Electrostatics in the Petroleum Industry, the Prevention of Explosion Hazards. Royal Dutch Shell Research and Development Report. Amsterdam/London/New York, Elsevier 1958.
- [4] K. Nabert und G. Schön: Sicherheitstechnische Kennzahlen brennbarer Gase und Dämpfe. 2. Auflage, Berlin, Deutscher Eichverlag 1963.
- [5] H. Selle und J. Zehr: Kennzahlen brennbarer technischer Stäube. Berufsgenossenschaft -(1955)3, S. 91...96.
- [6] M. Korschak und P. Voigtsberger: Untersuchungen über die elektrostatische Aufladung von Gasen. Arbeitsschutz 6(1961)8, S. 196...204.
- [7] H. Freytag: Handbuch der Raumexplosionen. Weinheim/Bergstrasse, Verlag Chemie 1965.
- [8] Electrostatics. National Safety Council Publication Nr. 547. Chicago, Juli 1964.

Adresse des Autors:

Dr. Heinz Haase, Technisch-Physikalisches Laboratorium, Beselerstrasse 3, D - 2 Hamburg-Grossflottbek 1.

Prüfung und Beurteilung der thermischen Beständigkeit von elektrischen Isolierstoffen und Isolationen

Von K. Michel, Baden

621.315.61:620.179.13

Mit der Tendenz, die Ausnützung elektrischer Maschinen und Apparate weiter zu steigern, wird die Wärmebeständigkeit der Isolation zu einem der wichtigsten Faktoren für die Betriebstüchtigkeit und Lebensdauer elektrischer Einrichtungen. Die bekannte Wärmeklassifikation der Isolierstoffe, die mit der Entwicklung neuer Isolierstoffe nicht mehr Schritt zu halten vermag, erweist sich als ungenügende Richtlinie für einen technisch und wirtschaftlich optimalen Isolationsaufbau. Die aus der chemischen Reaktionskinetik ableitbare Gesetzmässigkeit der thermischen Alterungsvorgänge ermöglicht es aus beschleunigten Alterungsversuchen Schlüsse zu ziehen auf das Langzeitverhalten von Isolierstoffen. Anerkannte thermische Prüfmethoden für Isolierstoffe, z. T. auch durch die Commission Electrotechnique Internationale (CEI) übernommen, betreffend die Lackisolation von Drähten, Isolierlacke, steife und flexible Isolierstoffe, werden kurz beschrieben. Der thermischen Klassifikation der Isolationen sollten jedoch nicht Untersuchungen an einzelnen Isolierstoffen, sondern an vollständigen Isolationssystemen zugrunde gelegt werden, wie sie für die Wicklungsisolation von Motoren, Transformatoren, Vorschaltgeräten zu Entladungslampen beschrieben sind.

Par suite de la tendance à soumettre les machines et appareils électriques à une utilisation toujours plus poussée, la stabilité thermique de l'isolation devient l'un des éléments les plus importants de la qualité fonctionnelle et de la longévité des équipements électriques. La classification thermique usuelle des matières isolantes, qui se trouve dépassée en suite de la création d'isolants nouveaux, ne fournit pas des indications suffisantes pour réaliser, dans chaque cas, une isolation offrant la meilleure combinaison d'avantages techniques et économiques. Le fait que le vieillissement thermique obéit à une loi, qui découle de la cinétique des réactions chimiques, permet, pour un isolant, de se baser sur des essais de vieillissement accélérés et d'en tirer des conclusions quant à la stabilité de cette matière en usage prolongé. L'auteur décrit brièvement des méthodes reconnues et adoptées en partie par la Commission Electrotechnique Internationale (CEI) pour les essais thermiques des vernis isolants, de l'isolation des fils émaillés, ainsi que d'autres isolants, rigides et flexibles. La classification thermique des isolations ne devrait toutefois pas être basée sur des essais individuels des matières qui les constituent, mais sur des essais de systèmes isolants complets, tels qu'ils sont décrits pour l'isolation des enroulements de moteurs, transformateurs et appareils auxiliaires de lampes à décharge.

1. Einleitung

Der empfindlichste, am meisten gefährdete Bestandteil elektrischer Maschinen und Apparate ist in der Regel die Isolation. Die mechanischen Teile und das Leitersystem, im wesentlichen aus metallischen Werkstoffen aufgebaut, lassen sich nach bewährten Regeln, gestützt auf zuverlässige theoretische Grundlagen und praktische Erfahrung so gestalten und bemessen, dass sie dauernd ihren Zweck erfüllen. Beim Aufbau der Isolation kommt der Konstrukteur dagegen häufiger in die Lage unsicheres Neuland zu betreten. Neben den aktiven Elementen der Konstruktion übt die Isolation eine Schutzfunktion aus. Sie soll ein Minimum an Raum einnehmen, um die Funktionen des Magnet- und Leitersystems möglichst wenig zu beeinträchtigen und um die Wärmeabfuhr nicht mehr als unbedingt nötig zu behindern. Mit der Entwicklung zu immer höherer Ausnützung der Maschinen und Apparate werden die Anforderungen an die Isolation ständig höhergespannt. Neben der dielektrischen und mechanischen Beanspruchung wird vor allem das thermische Verhalten mehr und mehr zum Kriterium für die Eignung der Isolation.

Während die metallischen Teile ohne grosse Schwierigkeiten wesentliche Steigerungen der Betriebstemperatur zulassen, ergeben sich bei der Isolierstoffen grundsätzliche und oft schwer zu überblickende Probleme. Von Natur aus sind die für die Verwendung in Maschinen und Apparaten geeigneten Isolierstoffe, als organische Werkstoffe oder als Werk-

stoffkombinationen, in welchen anorganische Stoffe wie Glasfaserprodukte, Glimmer oder Asbest durch organische Bindemittel erst einsatzfähig werden, empfindlich auf hohe Temperaturen und besonders auf langdauernde Wärmeeinwirkung. Im Mittelpunkt der Diskussion über die elektrische Isolation steht deshalb heute die Beurteilung und Prüfung des thermischen Verhaltens der Isolierstoffe und der daraus aufgebauten Isolationssysteme.

2. Klassifikation der Isolierstoffe nach ihrer Wärmebeständigkeit

Bereits vor mehreren Jahrzehnten wurden die in elektrischen Maschinen und Apparaten verwendeten Isolierstoffe, gestützt auf die praktische Erfahrung, entsprechend ihrer unterschiedlichen thermischen Beständigkeit in Gruppen unterteilt. International fand diese Klassifikation ihren Niederschlag in der Publikation 34 der CEI, «Règles pour les machines électriques», von 1930, revidiert in 1935. Nach der Art und Zusammensetzung der verwendeten Isolierstoffe wurden 4 Klassen mit zunehmender Wärmebeständigkeit unterschieden:

- Klasse 0: Organische Isolierstoffe (wie Papier oder Textilien aus Baumwolle, Seide) ohne Imprägnierung.
- Klasse A: Organische Isolierstoffe imprägniert mit Lacken, Harzen, Giessmassen oder unter Öl.
- Klasse B: Anorganische Isolierstoffe (wie Glimmer, Asbest, Glasfaserprodukte) mit organischen Bindemitteln.
- Klasse C: Anorganische Isolierstoffe (wie Glimmer, Keramik, Glas) ohne organische Bindemittel.

Diesen vier Isolationsklassen wurden individuell für die einzelnen Maschinentypen bestimmte zulässige Erwärmungen Δt zugeordnet.

Die stürmische Entwicklung auf dem Gebiet der Kunststoffe und Isoliermaterialien in den letzten 20 bis 30 Jahren machte es notwendig die Klassifikation von 1930, bzw. 1935, neu zu konzipieren und zu erweitern. Die vertieften Kenntnisse und die Ergebnisse der in verschiedenen Ländern, besonders aber in den USA, durchgeführten systematischen Untersuchungen wurden zum Ausdruck gebracht in der Publikation 85 der CEI, «Recommandations relatives à la classification des matières destinées à l'isolement des machines et appareils électriques en fonction de leur stabilité thermique en service» von 1957.

Massgebend für die Zuteilung der Isolierstoffe ist nicht mehr die zulässige Erwärmung, sondern die höchst zulässige Grenztemperatur (hottest spot temperature), die an einem isolierten Teil einer Maschine oder eines Apparates auftreten darf, ohne dass das Material der betreffenden Isolationsklasse innerhalb der üblichen Gebrauchsdauer der Maschine seine Funktionstüchtigkeit einbüsst. Festgelegt sind nun, aufbauend auf die alte Klassifikation, die folgenden Isolationsklassen und zugeordneten Grenztemperaturen:

Klasse	Grenztemperatur
Y (früher 0)	90 °C
A	105 °C
E	120 °C
B	130 °C
F	155 °C
H	180 °C
C	über 180 °C

Aus der Erkenntnis heraus, dass es bei der heutigen Vielfalt von Isolierstoffen nicht mehr möglich ist durch eine einfache Bezeichnung des Produktes oder durch eine summarische Angabe seiner chemischen Zusammensetzung die Eigenschaften des Stoffes und damit sein thermisches Verhalten genügend genau zu umschreiben, wurde auf eine verbindliche Zuordnung der einzelnen Isolierstoffe zu den Isolationsklassen verzichtet.

Die in der Publikation 85 der CEI enthaltenen Materiallisten sind ausdrücklich als unverbindliche Richtlinie zur Erleichterung der Wahl geeigneter Isolierstoffe aufgeführt. Es wird betont, dass nur die praktische Erfahrung oder geeignete und anerkannte Versuche definitiv für die einzelnen Produkte die Klassenzuteilung bestimmen sollten. Ausserdem wird anerkannt, dass die thermische Beständigkeit eines Isolierstoffes durch die Kombination mit andern Stoffen und durch die Art des Einsatzes und der Beanspruchung stark beeinflusst werden kann.

Entstanden als Kompromiss verschiedener Auffassungen und Tendenzen weist die Publikation 85 der CEI gewisse Unklarheiten und Widersprüche auf, die in den zahlreichen davon abgeleiteten nationalen Vorschriften (z. B. Publ.3009.1962, des SEV, «Regeln für elektrische Maschinen») zu unterschiedlichen Interpretationen geführt haben. Nach dem Titel der Publikation der CEI bezieht sich die Klassifikation auf die einzelnen Isolierstoffe. Andererseits wird aber gesagt, dass die in einer Maschine oder einem Apparat gemeinsam verwendeten Isolierstoffe ein Isolationssystem bilden, und dass es sinnvoller ist, die thermische Beständigkeit dieses Isolationssystems in Betracht zu ziehen als nur das Verhalten der einzelnen Isolierstoffe zu beurteilen. Die Klassen nach der Publikation 85 der CEI werden heute auf die

gesamte Isolation einer Maschine, wie auch auf die einzelnen Isolierstoffe angewendet. Das Klassifikationsprinzip, dass Isolierstoffe der Klasse A in einer Maschine der Klasse A, Isolierstoffe der Klasse B in einer Maschine der Klasse B etc. zu verwenden sind, kann aber nicht mehr befriedigen, da Erfahrung und Versuche zeigen, dass auch Isolierstoffe verschiedener Wärmeklassen, wenn sie zweckmässig miteinander kombiniert werden, ein zufriedenstellendes Verhalten in der Maschine gewährleisten können.

Viele isolierte Teile einer Maschine erreichen im Betrieb nicht die der Klassenzuteilung der Maschine entsprechende Höchsttemperatur. Je nach Aufgabe der Isolierstoffe im Isolationssystem und je nach ihrer Kombination mit andern Stoffen ergeben sich für den gleichen Isolierstoff häufig verschiedene Kriterien für seine Verwendbarkeit in einer bestimmten Maschinen-Wärmeklasse.

Das Comité d'Etudes 15, Matériaux isolants, der CEI schlägt deshalb in einer im Oktober 1964 aufgestellten Empfehlung vor, die bestehenden Isolationsklassen auf Isolationssysteme von Maschinen und Apparaten zu beschränken und unabhängig davon einen Temperatur-Index für die Charakterisierung der thermischen Beständigkeit der einzelnen Isolierstoffe unter ganz bestimmten Prüfbedingungen einzuführen. Dieser Temperatur-Index würde das Verhalten unter definierten Prüfbedingungen erfassen ohne zwangsläufige und allgemeingültige Begrenzung der betriebsmässigen Verwendung. Bei verschiedenen Prüfverfahren, welche z. B. in einem Fall mechanische Veränderungen oder in einem andern Fall elektrische Eigenschaften bei Wärmeeinwirkung berücksichtigen, können für den gleichen Isolierstoff auch verschiedene Temperatur-Indizes resultieren. Auf diese Weise soll der Konstrukteur konkrete Angaben als Richtlinie für die Materialwahl erhalten. Angaben, die sich auf vergleichbare technische Daten statt nur auf eine mehr willkürliche Klassifikation stützen.

Die Annahme dieser Überlegungen würde bedingen, dass die Temperatur-Klassifikation der Isolierstoffe, wie sie in der Publikation 85 der CEI verankert ist, revidiert wird. Als Konsequenz davon wären die Isolationsklassen elektrischer Maschinen und Apparate auf der Grundlage der thermischen Beständigkeit von Isolationssystemen festzulegen. Bestrebungen zu einer entsprechenden Revision der Publikation 85 der CEI sind im Schosse des zuständigen Sous-Comité 2C, Classification des matériaux isolants (Sous-Comité des Comité d'Etudes 2, Machines tournantes), seit einiger Zeit im Gange.

In einer Stellungnahme zur Revision dieser Publikation hat beispielsweise das Schweizerische Elektrotechnische Komitee im August 1963 folgende Gründe für das Ungenügen der Publikation 85 der CEI angeführt:

Aus der ursprünglich geplanten Klassifikation der Isolierstoffe ist eine thermische Klassifikation der Maschinen geworden. Diese Klassifikation der Maschinen auf der Grundlage der Klassifikation der verwendeten Isolierstoffe kann heute nicht mehr befriedigen, da das thermische Verhalten der einzelnen Isolierstoffe nur einer der Faktoren ist, welche die Lebensdauer der Maschinen bestimmen. Das thermische Verhalten eines Isolierstoffes ist keine definierte, zur absoluten Festlegung einer Grenztemperatur geeignete Eigenschaft. Je nach Art der Maschine, nach Einsatzort in der Maschine, nach Umgebungsbedingungen können die für das

thermische Verhalten eines Isolierstoffes massgebenden Faktoren sehr unterschiedliche Bedeutung haben, womit die starre Klassifikation sehr willkürlich erscheint. Es zeigt sich, dass bei der Aufstellung von Vorschriften für Maschinen und anderes elektrisches Material die Publikation 85 der CEI oft sehr unterschiedlich interpretiert wurde.

Es wird deshalb vorgeschlagen die Publikation 85 zur reinen thermischen Klassifikation der Maschinen umzugestalten und die Klassifikation der Isolierstoffe, insbesondere die entsprechenden Materiallisten daraus zu entfernen. Für die Wahl der geeigneten Isolierstoffe benötigt der Konstrukteur umfassendere und differenziertere Angaben. Es ist eine Aufgabe des Comité d'Etudes 15, Matériaux isolants der CEI, Methoden zur Bestimmung des thermischen Verhaltens von Isolierstoffen und gewisser Isolationssysteme aufzustellen und im Rahmen der «Enzyklopädie der Isolierstoffe» [1]¹⁾ zuverlässige Angaben über Materialeigenschaften zu vermitteln.

Ähnliche Überlegungen, wie sie in der schweizerischen Stellungnahme zum Ausdruck kommen, treten auch in andern Ländern, besonders in den Diskussionen der amerikanischen Fachkreise in Erscheinung.

3. Grundlagen zur Beurteilung der Wärmebeständigkeit

Die Unmöglichkeit die heute zur Verfügung stehenden Isolierstoffe in eine thermische Klassifikation mit starren und absoluten Grenztemperaturen einzuordnen, macht die Beurteilung der thermischen Eigenschaften auf Grund der «Erfahrung oder anerkannter Versuche», wie es heute in

¹⁾ Siehe Literatur am Schluss des Aufsatzes.

den entsprechenden Regeln heisst, zur Notwendigkeit. Da eine ausgedehnte praktische Erfahrung mit einem Grossteil der modernen, besonders für die höheren Wärmeklassen in Frage kommenden Isolierstoffen noch fehlt und der Maschinen- und Apparatebauer dringend auf diese neuen Materialien angewiesen ist, muss ihre Betriebstüchtigkeit für einen bestimmten Verwendungszweck durch geeignete Versuche nachgewiesen werden.

Bei der Charakterisierung des thermischen Verhaltens der Isolierstoffe ist grundsätzlich zu unterscheiden zwischen der reinen Temperaturabhängigkeit der Eigenschaften, die auf meist reversiblen, physikalischen Vorgängen beruht und der thermischen Beständigkeit oder Alterungsbeständigkeit, die durch irreversible stoffliche Veränderungen bestimmt ist (Tabelle I).

Die thermischen Kenngrössen von Isolierstoffen wie die spezifische Wärme, die Wärmeleitfähigkeit, die Wärmedehnung und das Verhalten der Isolierstoffe bei kurzzeitiger Wärmeeinwirkung, gekennzeichnet durch Zustandsänderungen wie Schmelzpunkt oder Erweichungstemperatur und durch die Temperaturabhängigkeit der mechanischen und dielektrischen Eigenschaften, lassen sich relativ einfach und zuverlässig in Kurzzeitversuchen erfassen.

Zur Beurteilung des mechanischen Verhaltens im Betrieb genügen aber in vielen Fällen derartige Kurzversuche nicht. Diese müssen durch Zeitstandversuche ergänzt werden um eine Voraussage über mögliche Deformationen im Betrieb bei langdauernder Wärmeeinwirkung bei gleichzeitiger mechanischer Beanspruchung aufstellen zu können. Für die Durchführung und Interpretation von Zeitstandversuchen be-

Charakterisierung des thermischen Verhaltens

Tabelle I

	Temperaturabhängigkeit der Eigenschaften	Thermische Beständigkeit (Alterungsbeständigkeit)
Bestimmende Faktoren	Temperatur (Zeit)	Temperatur Zeit Umgebungsfaktoren (Atmosphäre, Nachbarschaft anderer Stoffe, mechanische und dielektrische Beanspruchung)
Charakter der Veränderungen bei thermischer Beanspruchung	physikalisch, meist reversibel Veränderungen der mechanischen Eigenschaften (Festigkeit, Elastizitätsmodul etc.), thermoplastische Deformationen Veränderung der dielektrischen Eigenschaften (Isolationswiderstand, dielektrische Verluste, Durchschlagsspannung) Wärmedehnung, Wärmeleitung	chemisch und physikalisch, irreversibel Stoffliche Veränderungen wie Zersetzung Oxydation zusätzliche molekulare Vernetzung Hydrolyse Abgabe flüchtiger Bestandteile (z. B. Weichmacher) führen zu bleibenden Veränderungen der mechanischen und dielektrischen Eigenschaften (Alterung)
Erfassung des thermischen Verhaltens	Kurzzeitversuche: Bestimmung der Eigenschaften in Funktion der Temperatur, Messung der thermischen Kenngrössen wie spezifische Wärme, Ausdehnungskoeffizient, Wärmeleitfähigkeit Langzeitversuche: Bestimmung des mechanischen Zeitstandverhaltens	Langzeitversuche (Alterungsprüfungen) zur Erfassung des Temperatur-Zeit-Verhaltens von Isolierstoffen oder Isolationssystemen bis zur Erreichung von Eigenschaftsgrenzwerten, die für die Anwendung kritisch sind («Lebensdauerversuche»)

steht eine langjährige Erfahrung auf dem Gebiet der metallischen Werkstoffe, die auch weitgehend auf die Prüfung von Isolierstoffen angewendet werden kann.

Bei langdauernder Wärmeeinwirkung treten aber zu diesen rein physikalischen Temperatureffekten chemische Veränderungen der Werkstoffe hinzu, welche für die Lebensdauer, d. h. für die Dauer der Funktionstüchtigkeit der Isolation vor allem bestimmend sind. Für diese Alterungserscheinungen des Isolierstoffes sind ausser Temperatur und Zeit meist auch Umgebungseinflüsse wie die Atmosphäre, Feuchtigkeit und zusätzliche mechanische und elektrische Beanspruchungen massgebend. Durch diese komplexen Bedingungen wird die Ermittlung der thermischen Alterungsbeständigkeit von Isolierstoffen oder ganzen Isolationssystemen wesentlich schwieriger und problematischer als die heute durch viele anerkannte Prüfmethode erfasste Bestimmung der reinen Temperaturabhängigkeit verschiedener Materialeigenschaften. Doch sind gerade diese Alterungsprüfungen ein unentbehrliches Werkzeug für eine konkrete Wahl und den optimalen Einsatz der Isolierstoffe durch den Konstrukteur elektrischer Maschinen und Apparate.

Von der Maschine oder vom Apparat wird eine jahrelange Bewährung unter den gegebenen Betriebsbedingungen erwartet. Selbst wenn alle Faktoren der betriebsmässigen Beanspruchung erfasst werden könnten und bei der Prüfung mitberücksichtigt würden, sind Alterungsversuche unter den tatsächlichen Betriebsbedingungen in der Regel wegen untragbar langen Prüfzeiten nicht durchführbar.

Eine Verkürzung der Prüfdauer ist möglich, wenn die Anforderungen, besonders die Versuchstemperatur, erhöht werden. Das Prüfergebnis beruht dann aber weitgehend auf einer Extrapolation in Richtung der gegebenen Betriebsbedingungen, d. h. in der Regel auf die durch die Klassenzuteilung der Isolation bestimmte Grenztemperatur.

Bei den Zeitstandversuchen zur Ermittlung des mechanischen Verhaltens von Werkstoffen ist eine entsprechende Extrapolation durch lange Erfahrung gesichert und anerkannt. Bei thermischen Alterungsversuchen wird die Möglichkeit der Extrapolation durch den temperaturabhängigen Ablauf von chemischen Vorgängen bestimmt. Vorerst rein empirisch auf Grund von statistischen Untersuchungen an betriebsmässigen Isolationen und später auch theoretisch wurde versucht Gesetzmässigkeiten in der Abhängigkeit der Alterungserscheinungen von Temperatur und Zeit aufzufinden.

4. Abhängigkeit der Lebensdauer der Isolierstoffe von der Temperatur

Als Ergebnis von systematischen Untersuchungen über die Alterung der Isolation von Leistungstransformatoren stellte *Montsinger* 1930 die Regel auf, dass eine Temperaturerhöhung von 8 °C zur Verminderung der Lebensdauer der Isolation auf die Hälfte führt [2]. In andern Fällen wurde gefunden, dass die Halbierung der Lebensdauer durch Temperaturerhöhungen von 7...12 °C bewirkt wird. In allgemeiner Form wurde die Abhängigkeit der Lebensdauer von der Temperatur durch folgende Beziehung wiedergegeben:

$$Y = A e^{-m \cdot x} \quad (1)$$

wobei Y die Zeit, A und m Konstanten und x die Temperatur bezeichnen. In graphischer Darstellung mit linearer Teilung der Temperaturachse und logarithmischer Teilung der

Zeitachse ergibt sich aus dieser Beziehung eine Gerade für die Lebensdauerkennlinie.

Durch spätere Untersuchungen von *Büssing* [3] und *Dakin* [4] konnte gezeigt werden, dass das schon im vorigen Jahrhundert vom Chemiker *Arrhenius* formulierte Gesetz für die Temperaturabhängigkeit der Geschwindigkeit chemischer Reaktionen den Ablauf der thermischen Alterung von Isolierstoffen zuverlässiger erfasst als die einfache Beziehung nach *Montsinger*:

$$\log L = a + \frac{b}{T} \quad (2)$$

oder

$$L = a' e^{b/T} \quad (3)$$

L	Lebensdauer der Isolation bei der Temperatur T
a , bzw. a' , b	Materialkonstanten
T	absolute Temperatur [°K]

In der graphischen Darstellung wird nach diesen Gleichungen die Lebensdauer-Temperatur-Kennlinie eine Gerade, wenn als Ordinate die Zeit in logarithmischem Massstab und als Abszisse der reziproke Wert der absoluten Temperatur aufgetragen werden.

Dass die Temperatur-Zeit-Funktion der thermischen Alterung einer bestimmten Gesetzmässigkeit folgt, die ursprünglich für einfache, leicht überblickbare chemische Vorgänge abgeleitet wurde, ist nicht von vornherein selbstverständlich. Wie komplex aber die chemischen Vorgänge auch sind, die zur Zerstörung der organischen Stoffe führen, die als Isolierstoff oder als Bindemittel von anorganischen Isolierstoffen dienen, so zeigt es sich doch, dass häufig *ein* bestimmter Teilvorgang für den gesamten Reaktionsablauf und damit für die Zerstörungsgeschwindigkeit massgebend ist. Von verschiedenen hintereinander ablaufenden chemischen Reaktionen ist einzig die am langsamsten ablaufende für die Geschwindigkeit der gesamten Umsetzung massgebend. Von parallel verlaufenden Umsetzungen ist in der Regel eine von grösserer Bedeutung und damit bestimmend für die Lebensdauer einer Isolation. Die beschriebene Gesetzmässigkeit bildet somit eine brauchbare Grundlage für die Durchführung von Alterungsprüfungen, auch wenn gelegentlich Abweichungen beobachtet werden, die darauf zurückzuführen sind, dass unter Umständen bei höheren Temperaturen eine andere Reaktion dominierend wird als bei tieferen. Aus diesem Grunde haftet der Extrapolation von Temperatur-Zeit-Kennlinien aus Prüfergebnissen bei hoher Prüftemperatur in Richtung der erwarteten, niedrigeren Betriebstemperatur immer eine gewisse Unsicherheit an. Je weniger weit extrapoliert wird, umso sicherer wird das Ergebnis. Für den Ablauf von Alterungsvorgängen an Isolierstoffen ist nicht die zugeführte Wärmeenergie in Kalorien, sondern die Temperatur massgebend, da die an der Alterung beteiligten Vorgänge wie Oxydation, Hydrolyse, Polymerisations- und Zersetzungsvorgänge meist exotherm sind, d. h. selber Wärme liefern. Die Triebkraft für die Zerstörung dieser Stoffe ist stets vorhanden, bei tieferen Temperaturen ist jedoch der Ablauf gehemmt. Um reaktionsbereit zu werden, muss jedes Molekül diese Hemmung oder Energieschwelle, gekennzeichnet als Aktivierungsenergie ΔE , erst überwinden. Aus der thermodynamischen Theorie ergibt sich als Anteil reaktionsbereiter Moleküle an der Gesamtheit der zur Verfügung stehenden Moleküle n/N :

$$\frac{n}{N} = e^{-\Delta E/RT} \quad (4)$$

R ist die universelle Gaskonstante ($1,98 \text{ cal} \cdot \text{Grad}^{-1} \cdot \text{Mol}^{-1}$); T die absolute Temperatur in $^{\circ}\text{K}$.

Die Reaktionsgeschwindigkeit K ist proportional diesem Faktor n/N und einem weiteren Faktor A , der sich aus der Häufigkeit der möglichen molekularen Umsetzungen ergibt:

$$K = Ae^{-\Delta E/RT} \quad (5)$$

Für ein bestimmtes Reaktionssystem ist die einzige Variable in diesem Ausdruck die Temperatur T .

Der reziproke Wert dieses allgemein gültigen Ausdruckes für die Temperaturabhängigkeit der Reaktionsgeschwindigkeit ist proportional der Zeit, die benötigt wird um einen bestimmten Stoffumsatz, und damit einen bestimmten Grad der Zerstörung des Isolierstoffes zu bewirken. Man erhält damit das in Gl. (3) gegebene «Lebensdauergesetz».

Gleichartige Beziehungen gelten übrigens auch für die Temperaturabhängigkeit von physikalischen Vorgängen, die häufig an den Alterungsvorgängen in Isolierstoffen beteiligt sind, so für Verdampfungsvorgänge, wie den Weichmacherverlust vieler Kunststoffe und für Diffusionsvorgänge.

5. Durchführung und Auswertung von thermischen Alterungsprüfungen

Die weitgehende Anwendbarkeit der Lebensdauerregel nach Gl. (2), bzw. (3) auf die thermische Alterung von Isolierstoffen und Isolationssystemen ist heute allgemein anerkannt. Die Arrheniussche Gleichung, nach welcher der Logarithmus der «Lebensdauer» eine in der Regel lineare Funktion des reziproken Wertes der absoluten Temperatur darstellt, bildet die Grundlage aller neueren Vorschriften und Empfehlungen für Alterungsprüfungen. Sie gestattet aus relativ kurzzeitigen Prüfungen bei höheren Temperaturen Rückschlüsse zu ziehen auf die zu erwartende Lebensdauer bei tieferen, betriebsmässigen Temperaturen.

Die Alterungsprüfungen werden bei mindestens drei oder auch mehr verschiedenen Temperaturen durchgeführt. Ausser der rein thermischen Beanspruchung können in Nachahmung der betriebsmässigen Bedingungen als weitere Prüfparameter noch dielektrische Beanspruchung, Feuchtigkeitseinwirkung oder mechanische Beanspruchung einbezogen werden. Durch periodische Messungen werden Änderungen von charakteristischen für die Betriebstüchtigkeit massgeblichen Eigenschaften, wie z. B. Durchschlagspannung, Iso-

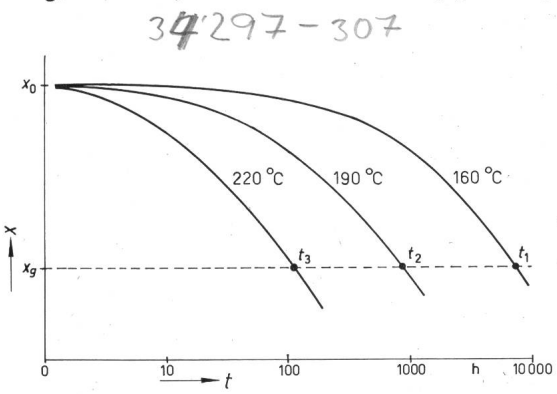


Fig. 1
Schema einer Alterungsprüfung

x untersuchte Eigenschaft; x_0 Eigenschaft vor der Alterung; x_g als Prüfkriterium festgelegter Grenzwert; t Alterungsdauer; t_1, t_2, t_3 Zeitwerte bis zum Erreichen des Eigenschaftsgrenzwertes für 3 Prüftemperaturen

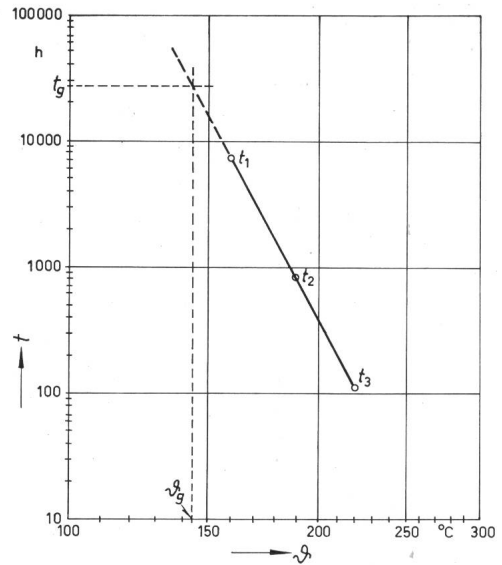


Fig. 2

Temperatur-Zeit-Diagramm («Lebensdauerdiagramm»)

t Alterungsdauer; ϑ Alterungstemperatur; t_1, t_2, t_3 Zeitwerte aus Fig. 1; t_g vorgesehene Gebrauchsdauer; ϑ_g resultierende Grenztemperatur

lationswiderstand, Verlustfaktor, mechanische Festigkeit, Flexibilität oder Gewichtsveränderungen verfolgt bis zur Erreichung eines kritischen Grenzwertes. Dieses Vorgehen ist schematisch in Fig. 1 dargestellt: Bei den 3 Alterungstemperaturen von z. B. 160, 190 und 220 $^{\circ}\text{C}$ wird der Abfall der Eigenschaft x bis zu dem als Prüfkriterium gewählten Grenzwert x_g verfolgt. Je nach Temperatur werden dafür Zeiten von t_1, t_2 , bzw. t_3 Stunden benötigt. Eingesetzt in das Zeit-Temperatur-Diagramm nach Fig. 2 liegen die drei Zeitwerte im Idealfall auf einer Geraden. Die so erhaltene Temperatur-Zeit-Kennlinie («Lebensdauerkurve») kann extrapoliert werden bis zu einer vorgesehenen Gebrauchsdauer t_g (nach deutschen Vorschriften z. B. 25 000 h, was ca. 3 Jahren entspricht). Dieser Gebrauchsdauer entspricht eine Grenztemperatur ϑ_g , die ein Mass darstellt für die unter bestimmten Bedingungen zulässige Temperatur bei Langzeitbeanspruchung.

Aber auch wenn die Temperatur-Zeit-Kennlinie keine Gerade bildet, was zu erwarten ist, falls der Reaktionsmechanismus der Alterung ändert beim Übergang von höheren auf niedrigere Temperaturen, so kann durch vorsichtige Extrapolation doch die Tendenz der Alterungsbeständigkeit bei der vorgesehenen Verwendungstemperatur abgeschätzt werden. Um eine unzulässig weite Extrapolation zu vermeiden, wird auf internationaler Basis empfohlen, die Alterungstemperaturen so zu wählen, dass der Versuch bei der niedrigsten Temperatur mindestens 5000 h dauert bevor der Prüfling ausfällt und dass Prüftemperaturen, die eine Prüfdauer von unter 100 h zur Folge haben, als zu hoch betrachtet werden.

Ungefähr zum gleichen Ergebnis führt die Empfehlung, die niedrigste Alterungstemperatur nicht mehr als etwa 20...30 $^{\circ}\text{C}$ über die erwartete Grenztemperatur anzusetzen [5]. Damit wird eine Extrapolation über das 3 bis 5-fache der längsten Prüfdauer als noch zulässig betrachtet.

Obwohl es das Endziel derartiger Alterungsversuche ist, in nützlicher Frist eine Prognose über das Verhalten der Isolation unter Betriebsbedingungen zu erhalten, sollte das

Alterungs- temperatur °C	Dauer der einzelnen Zyklen in Tagen für folgende erwartete Grenztemperaturen [°C]					
	105	120	130	155	180	über 180
300						1
290						2
280						4
270						7
260						14
250					1	28
240					2	49
230					4	
220				1	7	
210				2	14	
200			1	4	28	
190		1	2	7	49	
180	1	2	4	14		
170	2	4	7	28		
160	4	7	14	49		
150	7	14	28			
140	14	28	49			
130	28	49				
120	49					

von Methoden zur Prüfung einzelner Isolierstoffe oder einfacher Kombinationen wie Lackdrähte, Isolierlacke, Isolierfolien etc. Sie enthält allgemeine Angaben über die Wahl, die Vorbereitung und die Anzahl der Prüfkörper. Es wird auch empfohlen die Wärmelagerung bei mindestens 3 Temperaturen durchzuführen, die so zu wählen sind, dass eine vernünftige Extrapolation möglich wird. Mit der Wärmelagerung können zusätzliche Bedingungen wie Einwirkung von Flüssigkeiten oder verschiedenen Gasen kombiniert werden. Die Wärmealterung ist in Zyklen durchzuführen. Nach jedem Zyklus werden — normalerweise bei Raumtemperatur — Prüfungen durchgeführt. Die Alterungsperioden sind so anzusetzen, dass bei jeder Alterungstemperatur ungefähr die gleiche Anzahl Zyklen (vorgeschlagen werden 10 Zyklen) benötigt werden, bevor die Prüflinge ausfallen. Dies ist nur möglich, wenn die ungefähre «Lebenserwartung» schon zum voraus bekannt ist. Wenn das nicht der Fall ist, sind Vorversuche durchzuführen. In Tabelle II werden Richtlinien gegeben für die Wahl der Alterungstemperaturen und die Dauer der Zyklen im Hinblick auf die zu erwartende Grenztemperatur. Die Einwirkung von Feuchtigkeit, chemisch aggressiven Stoffen und Vibration ist als zusätzliche Bedingung vorgesehen für die Alterungsprüfung von Isolationssystemen, nicht aber von einzelnen Isolierstoffen.

Die Prüfkriterien für das Versagen des Isolierstoffes bei der Wärmealterung sollen realistisch, d. h. der praktischen Erfahrung angepasst sein und sich auf dielektrische, mechanische oder weitere gut bestimmbare Eigenschaften beziehen. Die Wahl eines festen prozentualen Abfalls einer Eigenschaft als Kriterium kann unter Umständen eine ungerechtfertigte Benachteiligung von Isolierstoffen mit hohen Anfangswerten darstellen.

Das gleiche Ziel wie die Publikationen des AIEE und der CEI verfolgen die deutschen Leitsätze VDE 0304, Teil 2 [10]. Bei weitgehender sachlicher Übereinstimmung enthalten sie darüber hinaus eine feste Bezugszeit:

«Als einheitliche Bezugszeit werden 25 000 h angesehen, woraus für Gerät oder Maschine aus verschiedenen Gründen

Ergebnis der Prüfung doch nicht ausschliesslich in der pedantischen Extrapolation auf eine stets mehr oder weniger hypothetische Grenztemperatur für eine festgelegte Gebrauchsdauer bestehen. Besonders wenn die Alterungsprüfung an einzelnen Isolierstoffen unter einfachen Prüfbedingungen mit einem einzigen bestimmten Prüfkriterium durchgeführt wird, ist es verfehlt daraus eine absolute zulässige Grenztemperatur und damit eine eindeutige Klassenzuteilung abzuleiten. Die zuverlässigsten Aussagen über das thermische Verhalten ergeben sich, wenn parallel zu den neuen, zu beurteilenden Materialien oder Materialkombinationen auch Produkte geprüft werden, über die bereits genügend praktische Erfahrung vorliegt. Der Vergleich der neu untersuchten mit den bewährten Prüfobjekten an Hand der sorgfältig ermittelten Temperatur-Zeit-Kennlinien, wobei der ganze Verlauf und die Variationsbreite zu berücksichtigen sind, gestattet eine vernünftige relative Einstufung im Rahmen der Versuchsbedingungen.

Wenn alle Faktoren, die für das Verhalten einer Isolation im Betrieb massgebend sind, erfasst werden sollen, so ergeben sich sehr umfangreiche und aufwendige Prüfungen. Um Zeit, Arbeit und Kosten zu sparen, ist es notwendig, die Alterungsversuche in Stufen zu unterteilen, die von einfachen, breit angelegten Versuchen mit allen interessierenden Varianten zu eigentlich funktionellen Prüfungen mit einer bereits beschränkten Auswahl von Varianten führen [6]:

- Prüfung von einzelnen Isolierstoffen oder einfachen Kombinationen (Elemente der Isolation),
- Prüfungen an modellmässigen Isolationssystemen oder konkreten Bauteilen von elektrischen Maschinen oder Apparaten,
- Prüfungen an kompletten Maschinen oder Apparaten.

Die Prüfung an Elementen erlaubt keine eindeutige, auf die Bewährung in einem Isolationssystem anwendbare thermische Klassifikation. Deshalb wurde vorgeschlagen das Prüfergebnis als Temperaturindex zu bezeichnen. Für die seriöse Festlegung der Isolation nach einer bestimmten Wärmeklasse sind dagegen Systemprüfungen durchzuführen [7].

5.1 Alterungsprüfungen an Isolierstoffen

Vor zehn Jahren wurde durch die bahnbrechenden Veröffentlichungen des American Institute of Electrical Engineers (AIEE) — seit 1963 umbenannt in Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) — mit der Aufstellung verbindlicher Richtlinien und Prüfvorschriften zur Erfassung der thermischen Beständigkeit von Isolierstoffen begonnen. Ausgehend von diesen AIEE-Publikationen sind seither in verschiedenen Ländern und im Rahmen der CEI auch international entsprechende Prüfverfahren ausgearbeitet worden. In der Publikation Nr. 1 des AIEE von 1954, revidiert in 1957 und 1962 [8] wurden in Ergänzung zur Festlegung der Isolationsklassen die allgemeinen Grundlagen für die Prüfverfahren dargelegt. Die Publikation Nr. 1D des AIEE von 1957 [9] enthält die grundsätzlichen, allgemein anwendbaren Festlegungen für die Durchführung von Alterungsversuchen an Isolierstoffen und einfachen Isolierstoffkombinationen. In Anlehnung an diese Publikation hat die CEI unter dem Titel «Guide pour la préparation de méthodes d'essai pour l'évaluation de la stabilité thermique des matériaux isolants électriques» eine Empfehlung ausgearbeitet, die 1964 nach Zustimmung sämtlicher Nationalkomitees für die Publikation freigegeben wurde. Zweck der Empfehlung ist Grundlagen und Richtlinien zu geben für die Aufstellung

(niedere Raumtemperatur, Teilbelastung oder Stillstandszeiten) als wahre Lebensdauer im Regelfalle ein Vielfaches hergeleitet werden kann.»

Dementsprechend ist die Grenztemperatur definiert:

«Durch Extrapolation ist die Grenztemperatur zu finden, bei der die zugelassene Eigenschaftsänderung in 25 000 Stunden erzielt wird.»

Von diesen nationalen oder internationalen Richtlinien und Empfehlungen leiten sich die Prüfmethode für bestimmte Isolierstoffkategorien ab. Am weitesten fortgeschritten sind die Vorschriften für Alterungsprüfungen an lackisolierten Drähten.

Nach dem Vorbild der Prüfmethode AIEE Nr. 57 [11], der «Twist-Alterungsmethode», wurde die CEI-Methode aufgestellt: Publ. 172 der CEI (1965) «Méthode d'essai pour l'évaluation de la stabilité thermique des fils émaillés, Première partie: Evaluation par l'abaissement de la rigidité diélectrique». Als Prüfkörper dienen zwei auf eine Länge von 125 mm miteinander verdrehte Drahtabschnitte (Fig. 3), die ohne zusätzliche Behandlung oder imprägniert mit einem Isolierlack zur Prüfung kommen können. Die imprägnierten Prüfkörper lassen eher Schlüsse zu auf das Verhalten von betriebsmässigen Wicklungen. Die Wärmealterungszyklen nach Tabelle II können ergänzt werden durch den Wechsel mit Feuchtlagerungszyklen (je 24 h bei 95 % relativer Feuchtigkeit und einer Temperatur von 40 °C) oder sie können kombiniert werden mit der Einwirkung von Gasen, Flüssig-

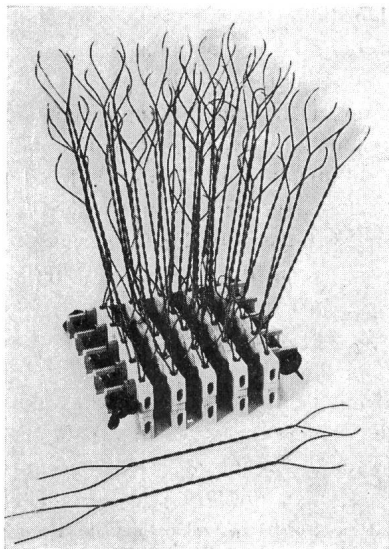


Fig. 3

Prüfkörper für Alterungsprüfung von lackisolierten Drähten nach Publ. 172 der CEI
Einzelne Prüfkörper und Halter mit 40 Prüflingen

keiten oder von Kernstrahlung. Das Kriterium für das Ausschneiden der gealterten Proben ist ihr Versagen bei der Spannungsprüfung mit einer Prüfspannung, die je nach Drahtdurchmesser und Lackauftrag zwischen 300 und 1200 V liegt.

Es ist vorgesehen neben dieser Methode, die als einziges Kriterium die Spannungsfestigkeit berücksichtigt (Teil I der Publ. 172 der CEI) und damit nur ein unvollständiges Bild über das thermische Verhalten des Drahtes geben kann, weitere Verfahren festzulegen, bei welchen andere Eigenschaften der Drahtisolation erfasst werden. Ein deutscher Normentwurf [12] sieht z. B. als Alterungsmerkmal neben

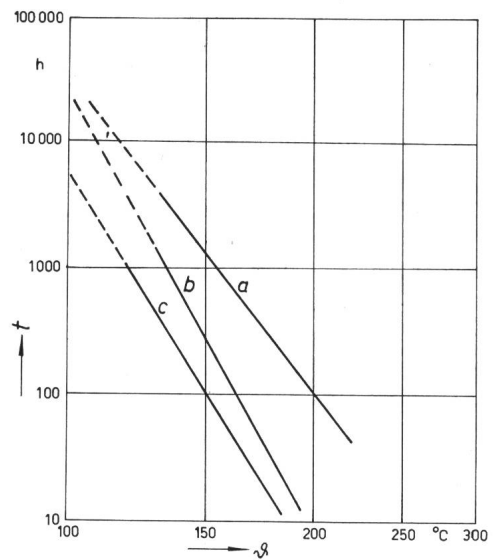


Fig. 4

Alterungsdiagramm für Acetallackdraht

t Alterungsdauer; θ Alterungstemperatur

Alterungskennlinien: *a* Kriterium: Durchschlagspannung nach Publ. 172 der CEI

b Kriterium: Gewichtsverlust 10 %

c Kriterium: Dehnbarkeit 20 % (Auftreten von Rissen beim Wickeln über einen Dorn vom fünffachen Drahtdurchmesser)

der Spannungsfestigkeit auch die Dehnbarkeit der Lackisolation vor. Vergleicht man die Temperatur-Zeit-Diagramme für verschiedene Eigenschaften, beispielsweise Spannungsfestigkeit, Dehnbarkeit der Lackschicht und Gewichtsverlust, so zeigt sich in Fig. 4 und 5, dass der Verlauf der Kennlinien nicht ohne weiteres parallel ist, und die ermittelte Alterungsgeschwindigkeit nicht nur mit der Art der Lackisolation, sondern auch mit der durch die Prüfung erfassten Eigenschaft zusammenhängt.

Das thermische Verhalten von Isolierlacken wird in Amerika häufig nach der «Helical Coil Test»-Methode [13; 14] geprüft. Das Comité d'Etudes 15 der CEI hat diese Methode übernommen in einem Entwurf für eine CEI-Publikation

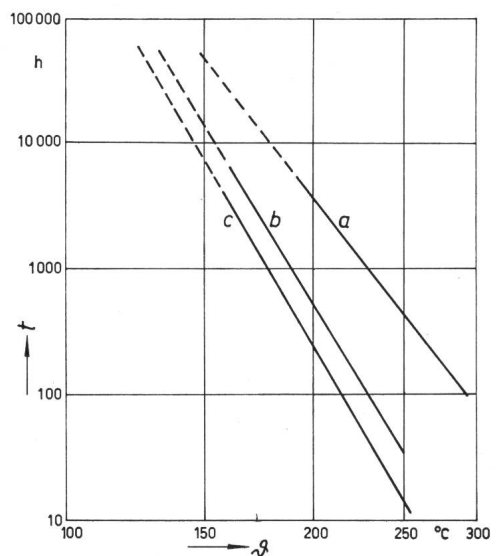


Fig. 5

Alterungsdiagramm für Polyesterlackdraht
Bezeichnungen siehe Fig. 4

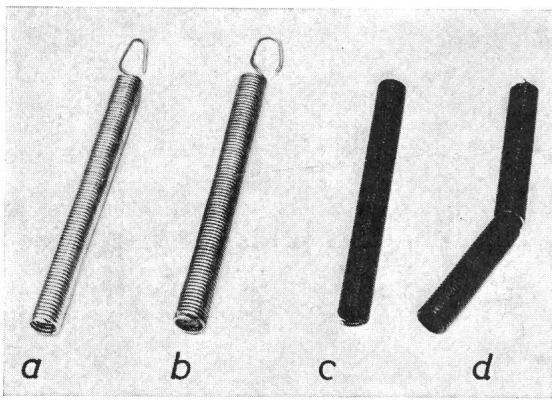


Fig. 6

Prüfkörper für die Untersuchung des thermischen Verhaltens von Isolierlacken

a unbehandelte Al-Drahtspirale; *b* lackierte Al-Drahtspirale, ungealtert; *c* lackierte Al-Drahtspirale, gealtert; *d* lackierte Al-Drahtspirale, gealtert, nach dem Biegeversuch

«Evaluation des propriétés thermiques des vernis isolants au moyen de bobine hélicoïdale». Die Prüfkörper bestehen aus 75 mm langen und 6,3 mm weiten Spiralen aus Aluminiumdraht von 1 mm Durchmesser, die zweimal mit dem zu prüfenden Lack imprägniert sind (Fig. 6). Für kombinierte Prüfungen zur Erfassung der Verträglichkeit des Isolierlackes mit der Drahtisolation können an Stelle des Aluminiumdrahtes auch lackisolierte Kupferdrähte verwendet werden. Geprüft wird die Verklebungsfestigkeit des Lacks durch die Bestimmung der Bruchlast der verfestigten Spiralen in einem Biegeversuch. Durch Messungen im ungealterten und gealterten Zustand und bei verschiedenen Prüftemperaturen, lassen sich die Temperaturabhängigkeit und die Alterungsbeständigkeit der Verklebung ermitteln. Die Durchführung der Alterung und die Auswertung erfolgen wiederum nach den erwähnten Richtlinien.

Da die Verklebung einer Wicklung nicht die einzige Funktion eines Isolierlackes ist, müssen auch hier weitere Eigenschaften untersucht werden um die praktische Eignung des Lackes beurteilen zu können. Nach der amerikanischen Methode ASTM D 1932—61 T («Curved electrode test») [15], die ebenfalls zur Übernahme als eine CEI-Methode zur Diskussion steht, werden Abschnitte von Glasgewebe mit den zu untersuchenden Lacken imprägniert und dann gealtert. Prüfkriterium ist der Abfall der Durchschlagspannung, gemessen mit einer zylindrisch gekrümmten Elektrodenanordnung, womit zusätzlich die zunehmende Versprödung der Lackschicht erfasst wird. Die deutsche Norm DIN 46456 [16] ordnet die Tränkclacke bestimmten Grenztemperaturbereichen zu, gestützt auf Alterungsprüfungen nach VDE 0304 [10]. Als Kriterien werden aufgeführt: Gewichtsverlust von höchstens 30 %, Rissfreiheit nach einem Dornbiegeversuch und eine Durchschlagspannung von mindestens 4 kV an lackierten Glasgewebestücken.

Mit der Ermittlung der thermischen Beständigkeit von steifen elektrischen Isolierstoffen befasst sich die Methode ASTM D 2304-64 T [17]. Nach den Grundsätzen der Publikationen des AIEE werden an steifen Isolierstoffen (wie Preßstoffen, Schichtpreßstoffen, Giessharzteilen) Alterungsprüfungen durchgeführt. Prüfkriterien sind die Durchschlagspannung, gemessen an Platten von 1,6 mm Dicke, die Biegefestigkeit an Flachstäben und die Wasserabsorption an denselben Flachstäben. Eine entsprechende Empfehlung steht

auch auf dem Arbeitsprogramm des Comité d'Etudes 15 der CEI.

Die thermische Beständigkeit von flexiblen Isolierstoffen suchen die amerikanischen Methoden nach ASTM D 1830-61 T [18] und in etwas erweiterter Form nach NEMA VF 30-1963 [19] zu erfassen. Prüfkriterium ist wie bei ASTM D 1932 [15] der Abfall der Durchschlagspannung nach Alterung, gemessen mit der zylindrisch gekrümmten Elektrodenanordnung; wobei nach NEMA der Endpunkt durch den Abfall um 50 % gegenüber dem Wert im ungealterten Zustand definiert ist.

5.2 Alterungsprüfungen an Isolationssystemen

Korrekt durchgeführte Alterungsprüfungen an einzelnen Isolierstoffen oder einfachen Kombinationen ermöglichen einen objektiven Vergleich neuer Produkte mit bisher verwendeten, über welche schon längere praktische Erfahrungen vorliegen. Das Ergebnis ist ein relativer, durch die gewählten Prüfbedingungen und -kriterien massgebend bestimmter «Temperatur-Index». Daraus eine absolute Grenztemperatur oder eine Gewähr für die Eignung dieser Produkte in einer kompletten Isolation eines Gerätes bestimmter Wärme Klasse abzuleiten ist nicht statthaft. Man bemüht sich deshalb die Untersuchung der thermischen Beständigkeit der Isolationselemente zu erweitern durch die Untersuchungen an vollständigen Isolationssystemen, die in ihrer Zusammensetzung und in ihrem Aufbau möglichst den betriebsmässigen Maschinen- und Apparateisolationen nachgebildet sind, wobei auch soweit erfassbar die Umgebungsfaktoren wie klimatische Verhältnisse, mechanische und dielektrische Beanspruchung mit erfasst werden.

In diesem Sinne wurden in den Vereinigten Staaten bereits 1957 Richtlinien für die Aufstellung von Verfahren zur Prüfung der thermischen Beständigkeit von Isolationssystemen aufgestellt [20]. Diese Richtlinien, herausgegeben als Publikation AIEE Nr. 1 E, enthalten allgemeine Festlegungen und Empfehlungen über die Versuchsobjekte und die Versuchsbedingungen. Es wird empfohlen soweit praktisch möglich die Versuche an Originalgeräten durchzuführen. Wenn die Grösse der Objekte oder andere Umstände dies untragbar machen, können die Versuche mit Modellen, welche die wesentlichen Elemente des zu beurteilenden Gerätes enthalten, durchgeführt werden. Die thermische Alterung, für welche ebenfalls die in Tabelle II gegebenen Empfehlungen für Alterungstemperaturen und Dauer der Zyklen gelten, ist in Anlehnung an die betriebsmässigen Bedingungen zu ergänzen durch Perioden mit Feuchtlagerung und durch zusätzliche mechanische und dielektrische Beanspruchung. Die Verkürzung der Prüfdauer gegenüber der zu erwartenden Lebensdauer des Gerätes im Betrieb, soll nur durch die Erhöhung der Temperaturen im Versuch erreicht werden, während die zusätzlichen Umgebungsfaktoren im Rahmen der betriebsmässigen Bedingungen zu halten sind. Wird zum Beispiel eine Spannungsprüfung zur Bestimmung des Endpunktes (Versagen des einzelnen Prüfobjektes) benutzt, so ist eine Prüfspannung zu wählen, welche gegenüber der Betriebsspannung nur soweit erhöht ist, dass das Gerät noch immer als funktionstüchtig betrachtet werden kann, und nicht eine übersetzte Prüfspannung wie sie normalerweise vom neuwertigen Gerät gefordert wird.

An diese allgemeinen Richtlinien halten sich die detaillierten Vorschriften des AIEE für die Prüfung der Isolationssysteme von Maschinen und Trockentransformatoren. Die Publikation AIEE Nr. 510 (neue Bezeichnung IEEE Nr. 117) [21] betrifft Isolationssysteme von Maschinen mit wild gewickelten Spulen und umfasst die Prüfung an Motoretten, d. h. Nutenmodellen mit zwei übereinanderliegenden, durch eine Phasenisolierung getrennten Halbspulen, an normalen Motoren bis 600 V Betriebsspannung, und in einem Anhang an kleinen Gleichstrom-Feldspulen bis 600 V Betriebsspannung. Alle Prüfobjekte werden bei mindestens 3 verschiedenen Temperaturen (entsprechend Tabelle II) gealtert, wobei für jede Temperatur mindestens 5, bei Motoretten je 10 Prüflinge einzusetzen sind.

Die Motorette (Fig. 7) ist aufgebaut aus einem Metallträger, der die Nutenverhältnisse in einem Wechselstromstator nachbildet (Eisenlänge der gebräuchlichen Motorette ist 54 mm) mit 2 bifilar gewickelten Spulen, die unter sich

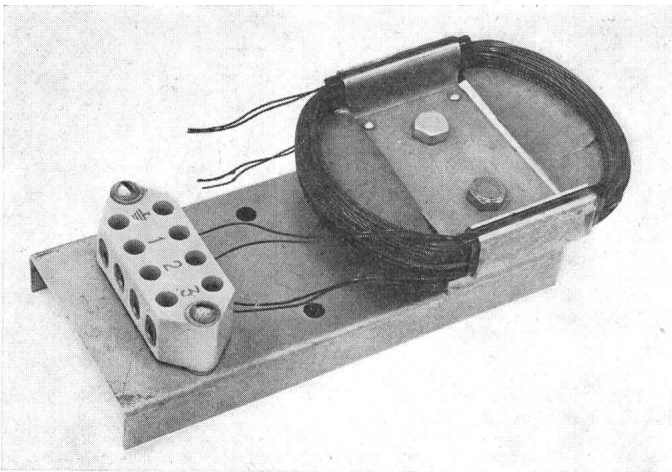


Fig. 7
«Motorette»-Prüfmodell für Alterungsversuche

durch eine Phasenisolierung und gegen Eisen durch eine Nutisolation und einen Nutverschluss isoliert sind. Die Ableitungen werden mit Isolierschlauch überzogen. Die Motorette wird mit dem gewählten Isolierlack oder -harz imprägniert und enthält damit alle Isolationssysteme der Statorwicklung eines üblichen Wechselstrommotors. Die einzelnen Alterungszyklen, jeweils gefolgt von Spannungsprüfungen zwischen den parallelen Leitern, den beiden Spulen und zwischen Wicklung und Eisen umfassen normalerweise:

- a) Wärmelagerung bei den entsprechenden Alterungstemperaturen;
- b) Anschliessende mechanische Beanspruchung durch Vibration auf dem Rütteltisch mit einer Beschleunigung von $1,5g_r$ bei 60 Hz während einer Stunde;
- c) Feuchtlagerung während 48 h in 100 % relativer Feuchtigkeit mit Kondensation auf dem Prüfling;
- d) Spannungsprüfungen in feuchtem Zustand während 10 min mit 50 V Windung gegen Windung und 600 V Phase gegen Phase bzw. Wicklung gegen Eisen.

Zusätzlich können auch Isolationswiderstand, dielektrische Verluste und Glimmintensität gemessen werden. Diese Zyklen werden wiederholt bis zum Versagen des Prüflings bei der Spannungsprüfung. Die Alterungstemperaturen sind so zu wählen, dass im Mittel 10 Zyklen vor dem Ausfall bestanden werden.

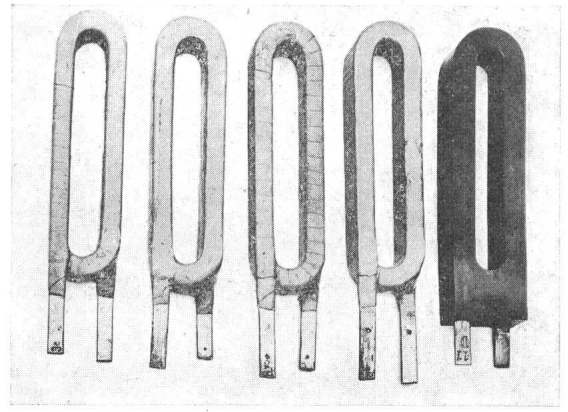


Fig. 8
Wendepolspulen für Alterungsversuche
Vergleich von gewickelten und imprägnierten Isolationen mit Giessharzisolierung

Bei der ebenfalls zyklischen Prüfung an kompletten Motoren erfolgt die thermische, mechanische und elektrische Beanspruchung gleichzeitig, indem während der Erwärmungsperioden die erfolgreiche Grenztemperatur bei Einphasenmotoren durch Start-Stop-Betrieb (mit mindestens 250 Abschaltungen pro Tag) und bei Mehrphasenmotoren durch Reversierbetrieb (mit mindestens 5000 Reversierungen pro Tag), eventuell unter Drosselung der Ventilation, erreicht wird. Die Befuchtung mit sichtbarer Kondensation auf der Wicklung wird bei spannungslosem Zustand des Motors nach jedem Betriebszyklus vorgenommen, wonach der noch feuchte Motor wieder in Betrieb gesetzt wird. Das Lebensende des Motors ist gegeben durch das Auftreten eines elektrischen Defektes bei maximaler Nennspannung.

Für die Untersuchung von Gleichstrom-Feldspulen dienen betriebsmässig ausgeführte, jedoch bifilar gewickelte Spulen, was eine Prüfung der Windungsisolierung erlaubt. Die Spule wird auf einen aus Blech geformten «Pol» aufgesetzt. Die zyklische Beanspruchung und die Ermittlung der Lebensdauer erfolgen grundsätzlich gleich wie bei den Motoretten.

Die Prüfungen nach AIEE Nr. 510, besonders die Motorette-Prüfungen haben sich als Standardmethode für Alterungsuntersuchungen allgemein eingebürgert und — wenn sinnvoll angewendet — auch bewährt. Die Erfahrungen mit den zahlreichen in den letzten 5 bis 10 Jahren durchgeführten Versuchen bestätigen die gute Übereinstimmung der Motorette-Ergebnisse mit dem Verhalten entsprechend ausgeführter Motoren in Alterungsversuchen und im Betrieb [22]. Auf amerikanische Initiative wurden die Prüfmethode auch dem Sous-Comité 2C der CEI als Vorschlag für eine CEI-Empfehlung unterbreitet.

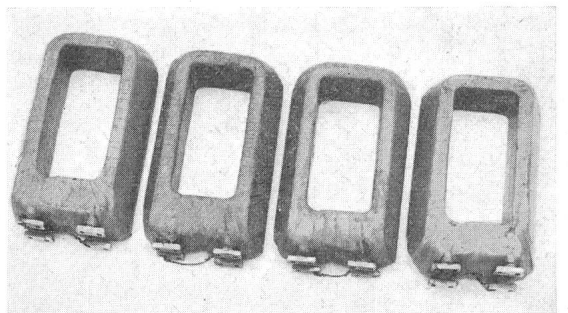


Fig. 9
Hauptpolspulen für Alterungsversuche
aus zwei parallelen Leitern gewickelt

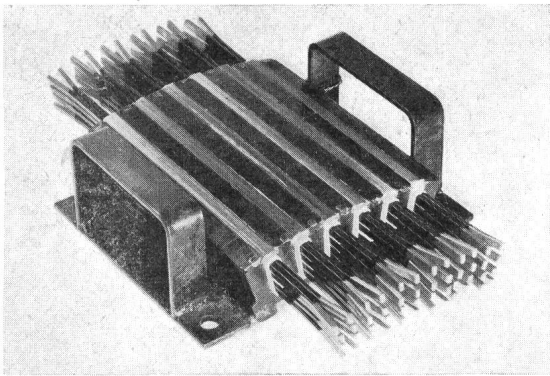


Fig. 10

Rotorwicklungsmodell für Alterungsversuche

aufgebaut aus geschichtetem Magnetblechsegment, Leiterbündel mit Einzelleiter- und Spulenisolation, Nutabschlusskeil und Imprägnierung

Die Anwendung der gleichen Prüfprinzipien auf die Isolationssysteme elektrischer Maschinen bis zu 2000 PS und 6,6 kV mit vollisolierten Formspulen ist in der Publikation AIEE 511 [23] beschrieben. Die möglichst wirklichkeitstreu ausgeführten, aus prüftechnischen Gründen aus zwei parallelen Leitern gewickelten Spulen werden ähnlich den Motoretten in ein Nutenmodell oder ein Polmodell eingebaut und in ähnlicher Weise beansprucht und geprüft. Als Beispiele derartiger Untersuchungen sind in Fig. 8 und 9 Polspulen und in Fig. 10 ein Rotorwicklungsmodell wiedergegeben, mit welchen Alterungsprüfungen für die Entwicklung neuer Klasse F- und Klasse H-Isolationen von Traktionsmotoren durchgeführt wurden [24]. Im Temperatur-Zeit-Diagramm nach Fig. 11 sind die Ergebnisse aus Alterungsprüfungen bei Temperaturen zwischen 130 und 250 °C an der Isolation von Polspulen eingetragen und zum Vergleich die hypothetischen «Lebensdauer kennlinien» für die verschiedenen Isolations-Wärme klassen, wie sie dem Alterungsprogramm nach Tabelle II zugrunde liegen. Es zeigt sich dabei, dass die Prüfanforderungen, nach Massgabe der praktischen Erfahrungen an Isolationen, die sich im Betrieb seit langem bewährt haben, sehr streng sind. Gestützt auf den Vergleich mit praktisch erprobten Isolationssystemen ergibt sich eine ausreichend sichere Beurteilung der thermischen Beständigkeit neuer Isolationssysteme der höheren Wärme klassen.

Sinn gemäss erweitert lassen sich diese Prüfverfahren auch auf die Isolation von Hochspannungsmaschinen anwenden [25; 26]. Die Durchschlagsfestigkeit und die Änderung der Spannungsabhängigkeit der dielektrischen Verluste reagieren empfindlich auf die thermische Schädigung der Isolation, die bei Bildung von Hohlräumen während der Alterung unter Hochspannung noch zusätzlich durch Glimmeinwirkung beansprucht werden kann. Entsprechend den verschiedenen Modellanordnungen für Alterungsversuche begegnet man ausser «Motorette» auch den Ausdrücken «Rotorette» (Rotorwicklungsmodell), «Slotette» (Nutenmodell), «Generette» (Generatorstabmodell).

Eine weitere amerikanische Prüfvorschrift, die Publikation AIEE Nr. 65 [27], bezieht sich auf die thermische Bewertung der Isolation von ventilierten Trockentransformatoren. Als Ausführungsbeispiel eines Prüfmodelles («Transformerette») wird eine Anordnung von ca. 28 × 28 × 32 cm dargestellt, welche eine Nieder- und eine Hochspannungs-

wicklung mit den für einen 15-kV-Transformator benötigten Isolierteilen enthält. Die beiden Wicklungen bestehen wiederum aus je zwei getrennten Leitersystemen. Jeder Alterungszyklus setzt sich aus einer Wärmeperiode (direkte Erwärmung durch Strom in den Wicklungen), einer elektrischen Prüfung in trockenem Zustand, einer Feuchtlagerung und der elektrischen Prüfung im feuchten Zustand zusammen. Die Alterung wird nach einem besonderen Alterungsprogramm, basierend auf einer Bezugszeit von 35 000 h (4 Jahre), durchgeführt. Der Endpunkt ergibt sich durch Versagen bei den Spannungsprüfungen (Hauptisolation mit 31 kV, Hochspannungsteilisolation 7 kV, Hochspannung-Windungsisolation 500 V, Niederspannungsisolation 1,2 kV).

Die konsequenteste Anwendung haben die Lebensdaueruntersuchungen an kompletten Isolationssystemen bisher bei der thermischen Klassierung von Vorschaltgeräten für Leuchtstofflampen in Deutschland gefunden [28].

Die Vorschrift VDE 0712 [29] verzichtet vollständig auf die Wiedergabe der Materiallisten nach Wärme klassen. Die Zuteilung der Vorschaltgeräte zu den 4 Temperaturgruppen nach VDE wird einzig vom Ergebnis einer thermischen Lebensdauer-Kurzprüfung an fertigen Geräten abhängig gemacht ohne irgendwelchen Vorschriften über die zu verwendenden Isolierstoffe.

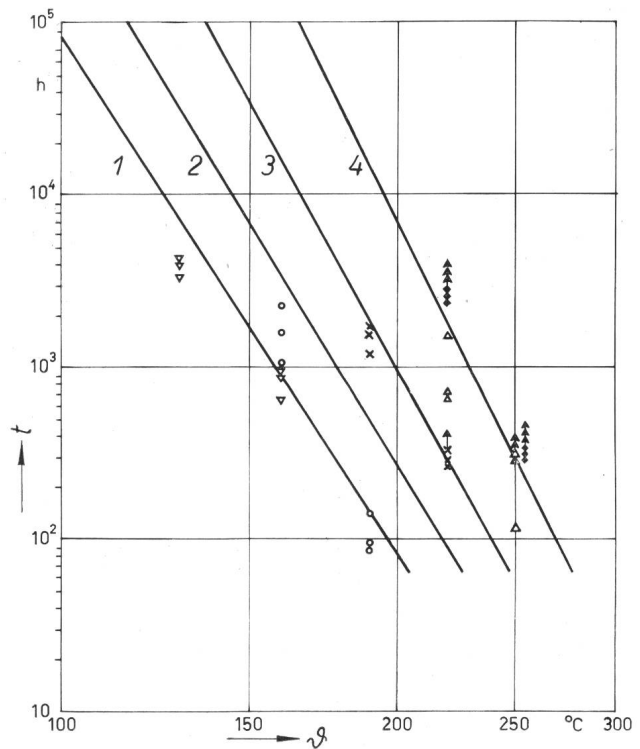


Fig. 11

Alterungsdiagramm aus Versuchen mit Wendepolspulen

t Alterungsdauer bis zum Ausfall der Spulen oder bis zum vorzeitigen Abbruch des Versuches (↑); θ Alterungstemperatur

Geprüfte Isolationstypen: ▽ Glasgewebe, Asphaltimprägnierung; ○ Glasgewebe, Phenolharzlack-Imprägnierung; × Glasgewebe, Epoxyd-Polyesterharz-Imprägnierung; △ Glasgewebe, Silikonlack-Imprägnierung; ◆ Glasgewebe-Glimmerkombination, Silikonlack-Imprägnierung

«Lebensdauer kennlinien» (schematisch): 1 für Grenztemperatur 105 °C Klasse A); 2 für Grenztemperatur 130 °C (Klasse B); 3 für Grenztemperatur 155 °C (Klasse F); 4 für Grenztemperatur 180 °C (Klasse H)

Literatur

- [1] Enzyklopädie der elektrischen Isolierstoffe. Klassifikation, Vergleichstabellen, Übersichtsblätter. Hg. SEV Zürich, 1960.
- [2] *V. M. Montsinger*: Loading Transformers by Temperature. J. AIEE 49(1930)4, S. 293...297.
- [3] *W. Büssing*: Beiträge zum Lebensdauergesetz elektrischer Maschinen. Arch. Elektrotechn. 36(1942)6, S. 333...361.
- [4a] *T. W. Dakin*: Electrical Insulation Deterioration Treated as a Chemical Rate Phenomenon. Trans. AIEE 67(1948)_, S. 113...122.
- [4b] *T. W. Dakin*: Electrical Insulation Deterioration. Electro-Technology 66(1960)6, S. 124...130.
- [5] *N. W. Edgerton*: The Philosophy of Thermal Aging Tests of Materials. IEEE Conference Paper CP 63-415, 1963.
- [6] *K. N. Mathes*: The Interpretation of Thermal Endurance Tests on Electrical Insulation. Proc. Electrical Insulation Conference 1960, Chicago, S. 154...155.
- [7] *J. F. Dexter*: Thermal Evaluation Test Procedures for Insulating Materials. Proc. Electrical Insulation Conference 1962, Washington. AIEE-Paper T-137-43.
- [8] General Principles upon which Temperature Limits are Based in the Rating of Electric Equipment. IEEE-Publication No. 1, 1962.
- [9] Guide for the Preparation of Test Procedures for the Thermal Evaluation of Electrical Insulation Materials. IEEE-Publication No. 98, 1957.
- [10] Leitsätze für Prüfverfahren zur Beurteilung des thermischen Verhaltens fester Isolierstoffe. Teil 2: Bestimmungen des Verhaltens von Isolierstoffen nach langandauernder Wärmewirkung. VDE-Vorschrift 0304 Teil 2 / 7. 59.
- [11a] Test Procedure for Evaluation of the Thermal Stability of Enameled Wire in Air. IEEE-Publication Nr. 57, 1959.
- [11b] Method of Test for Relative Thermal Endurance of Film-Insulated Round Magnet Wire. ASTM-Standard D 2307-64 T.
- [12] Kupferunddrähte isoliert. Prüfen des Wärmeverhaltens von Drähten mit Lackisolierung. DIN-Norm-Entwurf 46453 Bl. 2, April 1965.
- [13] *J. F. Dexter*: Simple Test Uses on Criterion. Few Samples to Evaluate Impregnating Varnishes. Insulation 1(1955)9, S. 12...19.
- [14] *D. L. McClenahan*: Bonding Characteristics of Insulating Varnish and Wire Enamel Systems. Wire and Wire Products 34(1959)12, S. 1623...1624 + 1672...1676.
- [15] Method of Test for the Evaluation of Thermal Endurance of Flexible Electrical Insulation Varnishes (Curved Electrode Test). ASTM Standard D-1962-61 T.
- [16] Isolierlacke und Isolierharze der Elektrotechnik, Tränklacke; Typen. DIN-Norm-Entwurf 46456 Bl. 2, April 1965.
- [17] Method for Thermal Evaluation of Rigid Electrical Insulating Materials. ASTM Standard D 2304-64 T.
- [18] Method of Test for Thermal Stability of Electrical Insulating Coated Fabrics by Curved Electrodes (Dielectric Breakdown Method). ASTM Standard D 1830-61 T.
- [19] Thermal Endurance and Classification of Flexible Electrical Insulation. NEMA Publication No. VF 30-1963.
- [20] Guide for the Preparation of Test Procedures for Thermal Evaluation of Insulation Systems for Electric Equipment. IEEE Publication No. 99, 1957.
- [21] Test Procedure for Evaluation of Systems of Insulating Materials for Random-Wound Electric Machinery. IEEE Publication No. 117, 1956.
- [22] *H. P. Boettcher* and *H. L. Emmons*: Results of Motorette Tests on Various Higher Temperature Insulation Systems. Insulation 9(1964)10, S. 34...38.
- [23] Proposed Test Procedure for Evaluation of Systems of Insulation Materials for Electric Machinery Employing Form-Wound Pre-Insulated Coils. AIEE Publication No. 511, 1956.
- [24] *K. Michel*: Das thermische Verhalten der Isolation elektrischer Maschinen. Brown Boveri Mitt. 51(1964)11/12, S. 630...639.
- [25] *B. Doljak* und *O. Wohlfahrt*: Die Isolationen von Statorwicklungen in Hochspannungsmaschinen. Brown Boveri Mitt. 51(1964)5, S. 274...280.
- [26] *J. Peter*: Alterungsversuche an Statorwicklungsstäben. Bull. sci. AIM 76(1963)_, S. 216...258.
- [27] Proposed Test Procedure for Thermal Evaluation of Ventilated Dry-Type Power and Distribution Transformers. IEEE Publication No. 65, 1956.
- [28] *C. H. Sturm*: Zur Frage der thermischen Lebensdauerprüfung von Wickelgütern. ETZ-B 14(1962)18, S. 483...486.
- [29] Vorschriften für Zubehör für Leuchtstofflampen und Leuchtstoffröhren mit Nennspannungen unter 100 V. VDE-Vorschrift 0712/1959.

Adresse des Autors:

Dr. Kurt Michel, AG Brown, Boveri & Cie., 5400 Baden.

Qualifikation gut beleuchteter Strassen und Anforderungen an die Fahrzeuglichter im Hinblick auf die Verkehrssicherheit

Vortrag, gehalten an der Diskussionsversammlung der SBK vom 6. April 1965 in Bern,

von R. Walthert, Bern

629.1.06 : 628.971.6

1. Einleitung

Es sind sich alle massgebenden Stellen darüber einig, dass der Strassenverkehr zu viele Opfer fordert. Man anerkennt auch die Forderung, technische Mittel zur Entschärfung des Verkehrs nach Möglichkeit heranzuziehen. Die starke Verkehrszunahme bringt es mit sich, dass dem Strassenverkehr bei Dunkelheit eine immer grössere Bedeutung zukommt. Diese Entwicklung bedeutet aber eine wesentlich stärkere Zunahme der Verkehrsunfälle bei Nacht als bei Tageslicht. Sehfehler, schlechtes Disponiertsein, Alkohol usw. steigern die Verkehrsgefährdung mit abnehmenden Sichtverhältnissen.

2. Unfallhäufigkeit und Unfallfolge im nächtlichen Strassenverkehr

Mit wenigen Zahlen kann leicht belegt werden, dass während der Dunkelheit die Unfallhäufigkeit weit grösser und die Unfallfolgen wesentlich schwerer sind als tagsüber. So ereignen sich, unter Berücksichtigung der Verkehrsfrequenz, bei Nacht doppelt so viele Unfälle als bei Tageslicht. Nach Angaben des Eidg. Statistischen Amtes waren 1964 mehr als ein Drittel der im Strassenverkehr getöteten Personen Fussgänger. Fast die Hälfte aller auf den Fussgängerstreifen getöteten Fussgänger waren nachts verunfallt. Das Polizeikommando des Kantons Zürich hat ermittelt, dass sich in ihrem Kanton 1964 31 % der Unfälle nachts zugetragen, und dass sich gar 44 % der Unfälle mit tödlichen Folgen während der Nachtstunden ereignet haben. Von ausserordentlich grosser

Bedeutung ist nun die Tatsache, dass gemäss eingehender Untersuchungen, sowohl in der Schweiz wie in fast allen verkehrsreichen Ländern Europas und den USA die Inbetriebnahme einer guten Strassenbeleuchtung die Nachtunfälle um 30...50 % vermindert hat. Hauptverantwortlich für die schlechte Unfallbilanz im nächtlichen Strassenverkehr sind ohne Zweifel die schlechten Sichtverhältnisse. Die Verbesserung der Sehbedingungen ist technisch möglich und muss somit von allen zuständigen Behörden angestrebt werden.

3. Anforderungen an gute ortsfeste Beleuchtung im Hinblick auf die Verkehrssicherheit

Die Festlegung der Anforderungen, welche im Hinblick auf die Sicherheit an eine als gut zu bezeichnende Strassenbeleuchtung gestellt werden müssen, hat in erster Linie nach verkehrstechnischen Erwägungen zu erfolgen. Die Sichtverhältnisse müssen so geschaffen sein, dass ein sicherer Verkehrsablauf gewährleistet wird.

Die grosse Schwierigkeit liegt nun darin, diese Sicherheit zu gewährleisten ohne den finanziellen Aufwand für die Strassenbeleuchtung so anwachsen zu lassen, dass ihre Verwirklichung verunmöglicht wird. Der Festlegung von minimalen Anforderungen kommt somit grösste Bedeutung zu. Die neuen schweizerischen Leitsätze für öffentliche Beleuchtung der SBK vom Februar 1961 basieren auf dem Gedanken, das Beleuchtungsniveau, die örtliche Gleichmässigkeit,