

Die Isolierstoffe elektrischer  
Maschinen unter Berücksichtigung  
der Heimstoffe

Dr.-Ing. habil. Heinrich Hess

 Springer

# Die Isolierstoffe elektrischer Maschinen unter Berücksichtigung der Heimstoffe

Von

**Dr.-Ing. habil. Heinrich Hess**

ord. Professor an der Technischen Hochschule Stuttgart



---

Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH

1942

**Herausgeber dieses Heftes:  
Prof. Dr.-Ing. A. Leonhard-Stuttgart**

**45 Abbildungen**

ISBN 978-3-322-98097-7      ISBN 978-3-322-98738-9 (eBook)  
DOI 10.1007/978-3-322-98738-9

**Alle Rechte vorbehalten**

## Vorwort

Seit der Erfindung des dynamoelektrischen Prinzips durch Werner von Siemens, die eine stürmische Entwicklung der Elektrotechnik einleitete, sind nahezu  $\frac{3}{4}$  Jahrhundert vergangen. Die einzelnen Maschinenarten, wie Gleichstrom-, Syn- und Asynchronmaschinen, wurden in ihrem grundsätzlichen Aufbau schon vor der Jahrhundertwende angegeben und in ihrer Wirkungsweise weitgehend bekannt.

Der jeweilige Stand der Entwicklung in irgendeinem Wissenszweige drückt sich augenfällig in Spitzenleistungen aus; in der Technik können als solche Spitzenleistungen z. B. maximale Leistungen je Maschineneinheit oder minimale Gewichte je Leistungseinheit angesehen werden. Grenzleistungen im Elektromaschinenbau stiegen in dem Jahrzehnt vor und nach dem Weltkriege mit Werkstoff- und Konstruktionsverbesserungen schnell an, wobei, wie das Beispiel des Turbogenerators zeigt, Fragen bald der mechanischen Festigkeit, bald der Kühlung ein Halt in der Leistungssteigerung für kürzere oder längere Zeit geboten. Ähnlich vollzog sich der Werdegang der Grenzgröße: Gewicht je Leistungseinheit, der in der Serienherstellung z. B. von Asynchronmaschinen besondere Bedeutung zukommt. Konstruktive Maßnahmen in der Belüftung und Verwendung von Leichtmetallen bei inaktiven Maschinenteilen kennzeichnen zwei der jüngsten Entwicklungsstufen für diese Grenzgröße. Mit dem Ausreifen der Gesamtgestaltung elektrischer Maschinen ist eine weitere Steigerung der erwähnten Grenzwerte allein durch konstruktive Maßnahmen kaum mehr zu erwarten. Das Haupthindernis

liegt jetzt in der Beschränkung der zulässigen Höchsttemperaturen. Maßgebend für diese Temperaturgrenzen sind die in der Maschine benötigten Isolierstoffe.

Die mit Grenzerwärmung und Maschinenausnutzung in engem Zusammenhang stehende Frage der geeigneten Isolierstoffe im Elektromaschinenbau blieb fast jahrzehntelang nahezu unbeachtet. Man wagte sich anscheinend an dieses Grenzgebiet der Chemie nicht recht heran, zumal längere Zeit dem Wettbewerb durch konstruktive Verbesserungen begegnet werden konnte, ohne daß dabei die Isolation als unüberwindliches Hindernis in der Entwicklung angesehen werden mußte.

Neuere Erkenntnisse in der Chemie über Molekülbau und Stoffkonstitution führten zu einem allgemeinen Umbruch in der Werkstoffauffassung, der sich auch auf die elektrischen Isolierstoffe erstreckte. Die Bestrebungen des Vierjahresplanes auf Verwendung von Heimstoffen förderten in stärkstem Maße die Entwicklung der Kunststoffe. Die Fülle der Neuerungen macht die Auswahl des richtigen Isolierstoffes schwierig, sofern Fehlschläge vermieden werden sollen. Andererseits ist gerade auf dem Gebiet der synthetischen Stoffe dem Chemiker die Möglichkeit gegeben, die Eigenschaften seiner Produkte weitgehend zu beeinflussen. Soll er hierbei den richtigen Weg gehen, muß er die vom Elektromaschinenbau verlangten Anforderungen an die Isolierstoffe kennen.

Diese Erkenntnis kann vermittelt werden durch Aufzählen der beim Bau und Betrieb für elektrische Maschinen auftretenden Isolationsbeanspruchungen und durch Vergleich der Neustoffe mit bekannten und in der Praxis bewährten Isolierstoffen. Wenn weniger auf eigene Messung verwiesen wird, sondern vielfach Ergebnisse aus dem Schrifttum herangezogen werden, so mag die Begründung in dem Vorhandensein zahlreicher Messungen an Isolierstoffen gerade aus jüngerer Zeit und der Langwierigkeit der experimentellen Be-

stimmung der den Elektromaschinenbauer besonders interessierenden Eigenschaften gesehen werden.

Meinem bewährten Mitarbeiter, Herrn Dipl.-Ing. W. Büssing, bin ich zu besonderem Dank für die Sichtung und Bearbeitung des benutzten Schrifttums verpflichtet.

Der Zweck der vorliegenden Abhandlung wäre völlig erreicht, wenn sie dem Chemiker als Hersteller die Wünsche des Elektromaschinenbauers für dessen derzeitige Sorgenkinder, die neuen Isolierheimstoffe, vermitteln und damit zur Förderung der immer mehr notwendigen Zusammenarbeit zwischen Chemiker und Elektrotechniker beitragen könnte.

Stuttgart, im Herbst 1941.

H. Hess

# Inhaltsverzeichnis

	Seite
<b>I. Einleitung</b> .....	1
Maschinenausnutzung im Zusammenhang mit Nutzfällfaktor und Temperatur .....	1
<b>II. Beanspruchungen und Anforderungen an Isolierstoffe im Elektro- maschinenbau</b> .....	6
a) Allgemeines .....	6
b) Wicklung .....	7
1. Leiterisolation .....	7
2. Nuttisolation .....	12
c) Stromwender und Schleifringe .....	24
d) Blechisolation .....	25
<b>III. Prüfungen</b> .....	27
<b>IV. Isolierstoffe des Elektromaschinenbaues und ihre Eigenschaften</b> .....	35
A. Allgemeines .....	35
B. Alte Isolierstoffe .....	37
a) Lackrohstoffe .....	37
1. Naturharze .....	37
$\alpha$ ) Terpentine .....	38
$\beta$ ) Kopale .....	38
$\gamma$ ) Schellack .....	38
2. Trocknende Öle .....	38
$\alpha$ ) Leinöl .....	38
$\beta$ ) Holzöl .....	39
3. Bitumen .....	39
4. Celluloseester .....	39
5. Lösungsmittel .....	39
6. Zusatzstoffe .....	40
b) 1. Lacke (allgemein) .....	40
$\alpha$ ) Harzlacke .....	42
$\beta$ ) Asphaltlacke .....	43
$\gamma$ ) Celluloseesterlacke .....	43
2. Lacke mit flüssigen Filmbildnern .....	43
3. Lacke mit festen und flüssigen Filmbildnern (Öllack)...	44
4. Compounds .....	44

	Seite
c) Naturfaserstoffe .....	45
1. Allgemeines .....	45
2. Baumwolle, Seide, Leinen, Jute .....	47
3. Fertige Isoliermaterialien aus Faserstoffen .....	48
d) Papier .....	53
e) Anorganische Isolierstoffe .....	61
1. Asbest .....	62
2. Glimmer .....	64
α) Glimmererzeugnisse .....	66
C. „Neue“ Isolierstoffe .....	67
a) Kunstharze .....	68
1. Allgemeines .....	68
2. Polykondensate .....	69
3. Polymerisate .....	70
b) Kunstharzlacke .....	70
c) Kunstfaserstoffe .....	73
1. Allgemeines .....	73
2. Kunstseide .....	74
3. Zellwolle .....	76
4. Synthetische Fasern .....	83
d) Folien .....	84
e) Anorganische Stoffe .....	85
1. Glas .....	85
2. Eloxal .....	99
<b>V. Ausführung der Isolation elektrischer Maschinen .....</b>	<b>103</b>
a) Allgemeines .....	103
b) Leiterisolation .....	103
c) Spulenisolation .....	119
1. Verteilte Wicklungen .....	119
α) Nutisolation .....	119
β) Wickelkopfisolation .....	129
2. Konzentrierte Wicklungen .....	131
d) Stromabnahme an rotierenden Wicklungen .....	132
e) Blechisolation .....	135
<b>VI. Anhang .....</b>	<b>140</b>
<b>Schrifttumsverzeichnis .....</b>	<b>147</b>



## I. Einleitung

Der Zweck einer Isolation besteht allgemein darin, Strömungen in bestimmte Bahnen zu lenken und mögliche Querwege zu versperren.

Die verschiedenen üblichen Isolierstoffe erfüllen diesen Zweck mehr oder weniger gut. Die Eignung eines elektrischen Isolierstoffes wird gewöhnlich durch die Werte seiner elektrischen Eigenschaften gekennzeichnet, wie Durchschlagfeldstärke, Isolationswiderstand usw. Im Elektromaschinenbau werden von dem Isolierstoff außerdem auch noch gute mechanische, thermische und chemische Eigenschaften gefordert. Es ist nun nicht gleichgültig, ob mit einem bestimmten Isolierstoff eine geforderte Eigenschaft, z. B. eine bestimmte Durchschlagfestigkeit, überhaupt erreicht werden kann; aus Gründen der Raumausnutzung und wirtschaftlichen Fertigung spielt vielmehr die Frage, mit welcher minimalen Menge des betreffenden Stoffes die notwendige Isolierung erzielt werden kann, eine ausschlaggebende Rolle.

### **Maschinenausnutzung im Zusammenhang mit Nutzfällfaktor und Temperatur**

Der Berechnung der Hauptabmessungen elektrischer Maschinen wird vielfach die sogenannte Essonsche Zahl  $C$  als Maschinenkonstante zugrunde gelegt. Sie stellt ein Maß dar für das aus einem bestimmten Volumen erzielbare Drehmoment und gibt die Ausnutzung des aktiven Materials der Maschine an. Entsprechend dem Produkt: Strom mal Spannung, durch das die elektrische Leistung definiert ist, gelten als aktives Material die Teile der Maschine, die an der Energieumsetzung direkt beteiligt sind und zur Führung des elektrischen Stromes und des magnetischen Feldes (Spannung) bestimmt sind, d. h. also das Material der Wicklungen und das des

magnetischen Kreises. Die Gleichung der Maschinenkonstante lautet bekanntlich:

$$C = \frac{N_i}{D^2 \cdot l_i \cdot n_s} = k_1 \zeta \xi \mathfrak{B}_l A_{eff} \left[ \frac{\text{kVA}}{\text{m}^3} \cdot \text{min} \right]. \quad (1)$$

Darin bedeuten:

- $N_i$  innere Leistung in kVA,
- $D$  Bohrungsdurchmesser der Maschine in m,
- $l_i$  ideelle Ankerlänge in m,
- $n_s$  synchrone Drehzahl in U/min,
- $k_1$  konstanter Zahlenfaktor,
- $\zeta$  Formfaktor der EMK,
- $\xi$  Wickelfaktor,
- $\mathfrak{B}_l$  mittlere Luftinduktion,
- $A_{eff}$  mittlerer effektiver Strombelag.

Wird der Strombelag  $A_{eff}$  durch die Stromdichte und die Nutdimensionen ausgedrückt, erhält man

$$A_{eff} = h_n \cdot \frac{b_n}{\tau_m} \left( 1 + \frac{h_n}{D} \right) f_n \cdot i = k_2 \cdot f_n \cdot i. \quad (2)$$

Hierin bedeuten:

- $h_n$  Nuthöhe,  $f_n$  Nutfüllfaktor,
- $b_n$  Nutbreite,  $i$  Stromdichte.
- $\tau_m$  mittlere Nutteilung,

Damit wird

$$C = k_1 \cdot k_2 \cdot \zeta \cdot \xi \cdot f_n \cdot \mathfrak{B}_l \cdot i. \quad (3)$$

Gleichung (3) stellt die zwischen Maschinenkonstante und Beanspruchungen der aktiven Baustoffe der Maschine gewünschte Beziehung dar. Danach ist also die Ausnutzungsziffer  $C$  direkt proportional dem Nutfüllfaktor, d. h. dem Verhältnis von Leiterquerschnitt in der Nut zum gesamten Nutquerschnitt. Das Gewicht des aktiven Materials einer Maschine, bezogen auf die Einheit der Leistung in kg/kVA, geht also umgekehrt proportional mit  $f_n$ . Da der Nutfüllfaktor  $f_n$  im allgemeinen wesentlich durch den Isolierstoff bestimmt ist, wird also derjenige Isolierstoff die günstigsten Verhältnisse er-

zielen, der imstande ist, mit der geringsten Auftragsstärke die an ihn gestellten Anforderungen zu erfüllen.

Diese Forderung auf geringen Auftrag läuft parallel mit einer zweiten, die an die Isolierstoffe gestellt werden muß, und zwar die der guten Wärmeleitfähigkeit.

Diese Eigenschaft wird verlangt, weil die bisher üblichen Isolierstoffe nur eine beschränkte Temperaturbeständigkeit aufweisen und man deshalb darauf bedacht sein muß, die in der Wicklung und im aktiven Eisen entstehende Verlustwärme mit möglichst geringem Wärmegefälle aus der Wicklung abzuleiten. Dieser Forderung nachzukommen ist aber bei Stoffen mit einer gegebenen spezifischen Wärmeleitfähigkeit, die bei den Isolierstoffen leider gering ist, nur möglich durch Verkürzung der Wege mit schlechter Wärmeleitfähigkeit, d. h. durch Anwendung möglichst geringer Isolationsstärken.

Auf Grund der erwähnten Temperaturempfindlichkeit der meisten Isolierstoffe macht sich ihr Einfluß auf die Maschinenausnutzung ein zweites Mal wesentlich bemerkbar. Denn man ist durch Festlegung der maximal zulässigen Temperaturen\*) gezwungen, auch bestimmte Maximalwerte der Stromdichte und Induktion nicht zu überschreiten, wie folgende kurze Rechnung zeigen möge.

Für die mittlere Wicklungstemperatur kann geschrieben werden (1):

$$\vartheta_{mitt} = K_1 \cdot i^2 + K_2 \cdot \mathfrak{B}_l^2 = i^2 \left[ K_1 + K_2 \frac{\mathfrak{B}_l^2}{i^2} \right]. \quad (4)$$

Hierin sind  $K_1$  und  $K_2$  für eine fertige Maschine konstante Werte, die von den Abmessungen und der Belüftung der Maschine abhängen; daraus folgt für  $i$ :

$$i = \sqrt{\frac{\vartheta_{mitt}}{K_1 + K_2 \frac{\mathfrak{B}_l^2}{i^2}}}. \quad (4a)$$

Weiter gilt:

$$V_{FeSt} = k_5 \cdot \mathfrak{B}_l^3; \quad V_{CuSt} = k_6 \cdot i^2,$$

\*) REM 0530, § 39.

wenn  $V_{FeSt}$  die Eisenverluste im Ständer (oder Läufer) und  $V_{CuSt}$  entsprechend die Kupferverluste im Ständer (oder Läufer) bezeichnen. Ferner sei:

$$\frac{\mathfrak{B}_l^2}{i^2} \sim \frac{V_{FeSt}}{V_{CuSt}} = a. \quad (5)$$

Für einen Wirkungsgrad, der definiert ist durch:

$$\eta = \frac{N_i}{N_i + V_{FeSt} + V_{CuSt}},$$

erhält man bekanntlich ein Maximum, wenn

$$V_{FeSt} = V_{CuSt}, \text{ also } a = 1 \text{ ist.} \quad (5a)$$

Unter dieser Voraussetzung wird:

$$i = K_3 \cdot \sqrt{\vartheta_{mitt}}, \quad (6)$$

$$\mathfrak{B}_l = K_l \cdot i. \quad (7)$$

Gleichung (7) in Gleichung (3) eingesetzt, ergibt:

$$C = K_1 \cdot k_1 \cdot k_2 \cdot \zeta \cdot \xi \cdot f_n \cdot i^2, \quad (8)$$

$$C = K \cdot \vartheta_{mitt} \quad (9)$$

mit

$$K = K_l \cdot k_1 \cdot k_2 \cdot \zeta \cdot \xi \cdot f_n \cdot K_3^2. \quad (9a)$$

Nach Gleichung (9) wäre es also theoretisch möglich, die Maschinenausnutzung durch gleichzeitige Erhöhung der Stromdichte und der Induktion proportional der zulässigen Temperatur heraufzusetzen, die in vernünftigen Grenzen nur von den verwendeten Isolierstoffen bestimmt ist.

Praktisch wird die Induktion mit Rücksicht auf den Leistungsfaktor bzw. den Aufwand an Erregerkupfer nicht wesentlich über die bisher üblichen Werte erhöht werden können. Bei konstanter Induktion erhält man dann mit Gleichung (4) und (3):

$$C = K' \sqrt{\vartheta_{mitt} - K_4}, \quad (10)$$

$$K' = k_1 \cdot k_2 \cdot \zeta \cdot \xi \cdot f_n \cdot \mathfrak{B}_l \cdot \frac{1}{\sqrt{K_1}}, \quad (10a)$$

$$K_4 = K_2 \cdot \mathfrak{B}_l^2, \quad (10b)$$

also eine Änderung der Ausnutzungsziffer mit der Wurzel aus der Differenz der mittleren zulässigen Temperatur und  $K_4$ ; hat die Größe  $K_4$  gegen  $\vartheta_{mitt}$  eine geringe Bedeutung, so ist

$$C \approx K' \sqrt{\vartheta_{mitt}}$$

Dieser Fall ist dann gegeben, wenn die Eisenverluste vernachlässigt werden und die Temperaturerhöhung nur durch die Kupferverluste bedingt ist. In Abb. 1 ist  $C$  in Abhängigkeit von der mittleren Maschinenüber Temperatur für verschiedene Größen von  $K_4$  aufgetragen. Dabei ist  $K'$  zu 0,4 angenommen. Der Wert  $K_4 = 0$  ergibt für  $C$  eine Parabel durch den Koordinatenursprung. Bei den heute üblichen mittleren Übertemperaturen von 60 bis 90°C spielt die Größe von  $K_4$  eine wichtige Rolle; in diesen Fällen genügt es nicht, nach der genannten Parabel — d. h.  $K_4 = 0$  — den Wert von  $C$  umzurechnen; die Eisenverluste, die in  $K_4$  ihren Ausdruck finden, müssen bei diesen kleineren Übertemperaturen berücksichtigt werden.

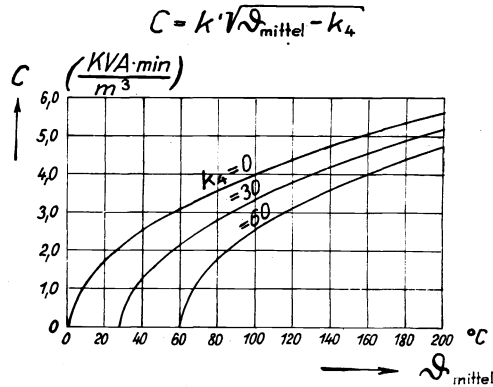


Abb. 1. Die Maschinenausnutzung  $C$  in Abhängigkeit von der mittleren Erwärmung.

Über die Zweckmäßigkeit einer höheren Ausnutzung kann man für den Allgemeinfall verschiedener Meinung sein, vorausgesetzt natürlich, daß Isolierstoffe zur Verfügung stehen, welche die damit verbundenen höheren Temperaturen, ohne zerstört zu werden, dauernd aushalten; denn durch die höheren Verluste und die dadurch bedingte Erhöhung der Temperatur treten Schwierigkeiten mechanischer Art auf, die sich überwinden lassen dürften; weiter ist damit ein, wenn auch geringer Abfall des Wirkungsgrades verbunden. Aber man wird immer dann eine Erhöhung der zulässigen Temperatur als vorteilhaft begrüßen, wenn niedriges Gewicht, hohe thermische Überlastbarkeit bzw. Betriebssicherheit vordringliche Forderungen sind, dagegen Wirkungsgrad und Leistungsfaktor nur eine untergeordnete Rolle spielen.

## II. Beanspruchungen und Anforderungen an Isolierstoffe im Elektromaschinenbau

### a) Allgemeines

Die Wahl eines Werkstoffes hat sich nach seinen Beanspruchungen beim Bau und Betrieb der Maschine zu richten; daher werden die verschiedenen im Elektromaschinenbau auftretenden Beanspruchungen zunächst zusammengestellt und des Näheren erläutert. Um Wiederholungen zu vermeiden, werden diese der Reihe nach aufgeführt, wie sie sich bei der Herstellung einer Wicklung, angefangen von der Bespinnung des blanken Drahtes bis zur Tränkung der fertigverlegten Wicklung in der Maschine und später bei der Prüfung und dem Betrieb der fertigen Maschine selbst ergeben. An Hand einer derartigen Zusammenstellung von Beanspruchungen läßt sich bei Neueinführung eines Isolierstoffes auf Grund seiner bekannten physikalischen Eigenschaften seine Eignung von vornherein besser zur Genüge beurteilen. Da es infolge des komplizierten Aufbaues der Wicklungen sowie der Vielzahl, der Verschiedenheit und der Unsicherheit in der Beurteilung der Beanspruchungen unmöglich ist, diese rechnerisch auch nur annähernd zu erfassen, bleibt man immer auch auf Versuche und Prüfungen besonderer Art angewiesen. Ihre Ergebnisse können, je nach der Prüfungsmethode, schon zuverlässige Angaben über die Brauchbarkeit vermitteln. Es wird auch möglich sein, die oft leicht zu bestimmenden physikalischen Eigenschaften solcher neuer Isolierstoffe mit denen schon verwendeter mehr oder weniger bewährter Materialien zu vergleichen und aus diesem Vergleich Rückschlüsse über eventuelle Brauchbarkeit zu ziehen. Darum erscheint es vorteilhaft, die meist bekannten Eigenschaften dieser älteren Isolierstoffe zusammenzustellen und so eine gute Vergleichsbasis zu schaffen. Das endgültige Urteil wird allerdings immer erst die Praxis sprechen; doch wird man durch diese Art

des Vorgehens sicherlich Mühe und Zeit sparen, wenn schon solche Voruntersuchungen bei einem zunächst hoffnungsvoll erscheinenden Isolierstoff dessen Unbrauchbarkeit sehr bald ergeben.

Im Elektromaschinenbau kommen die Isolierstoffe für die mannigfaltigsten Zwecke in Betracht; daher werden an sie jeweils verschiedene Anforderungen gestellt. Sie finden Verwendung bei folgenden Maschinenteilen:

- a) Wicklung als  $\alpha$ ) Leiterisolation,  
 $\beta$ ) Nutisolation,  
 $\gamma$ ) als Tränk- und Füllmassen;
- b) Stromwender und Schleifringen;
- c) Blechen;
- d) Schaltverbindungen und Befestigungen (Klemmbretter, Durchführungen, Bürstenhalter, Abstützungen, Bandagen).

Die Beanspruchungen der Isolierstoffe treten schon auf bei ihrer Verarbeitung und zwar beim Bau der Maschine, dann aber selbstverständlich in der Maschine während des Betriebes.

Es lassen sich unterscheiden Beanspruchungen:

1. elektrischer,
2. mechanischer,
3. thermischer,
4. chemischer Natur.

Dazu kommt für alle Isolierstoffe die Forderung, daß sie möglichst geringen Raum einnehmen sollen.

### **b) Wicklung**

1. Leiterisolation. Bei der Umspinnung der Leiter mit Faserstoffen sollen diese eine gewisse Zugfestigkeit, verbunden mit einer bestimmten elastischen Dehnung, aufweisen; denn die Umspinnung muß unter Vorspannung geschehen, damit die Isolation vermöge ihrer Dehnung fest auf dem Leiter sitzt und sich bei späterer Verarbeitung nicht verschieben läßt. Dadurch ist die Stärke des Fadens und der Isolationsauftrag auf ein bestimmtes Mindestmaß festgesetzt. Es

ist z. B. nicht möglich, Asbestfäden genügender Festigkeit mit der bei Baumwolle oder gar bei Seide üblichen Feinheit herzustellen. Zusätzliche Beanspruchungen können hinzutreten, die durch ungleichmäßiges Arbeiten der Spinnmaschinen, wie Klemmen der Zuführungen, verursacht werden. Bei der Eigenart dieser Fäden ist aber zu sagen, daß durch eine derartige Zugbeanspruchung eine dauernde, merkbare Verschlechterung der Isolation nicht auftritt. Dagegen können Glasfasergarne, die eine Sonderstellung unter den Faserstoffen einnehmen, hierbei allerdings Schaden davontragen, da die einzelnen Fasern verhältnismäßig spröde sind und daher leicht zerrissen werden, ohne daß dabei der ganze Faden zu Bruch geht. Da die Einzelfasern sehr glatt sind und leicht aneinander gleiten, wird damit die Fadenfestigkeit geschwächt und so dem Faden schon ein Teil seiner Widerstandskraft bei der Verarbeitung genommen. Bei Profildrähten sind zu scharfe Kanten tunlichst zu vermeiden, da bei zu kleinem Biegeradius Glasfäden infolge ihrer, gegenüber organischen Fasern höheren Sprödigkeit leicht brechen.

Der Auftrag der Isolation soll möglichst gleichmäßig sein. Dazu ist es erforderlich, daß die verwendeten Faserstoffe selbst in gleichmäßiger Stärke versponnen werden können und die Umspinnmaschinen so gebaut sind, daß ein gleichmäßiges Umspinnen oder Umklöppeln des Drahtes möglich ist. Asbest hat in dieser Hinsicht zunächst Schwierigkeiten bereitet und erst durch Umpressen des Drahtes nach Art eines nahtlosen Mantels wurde gleichmäßiger Auftrag erzielt.

Sollen Folien oder Papier zur Umbandelung des Drahtes verwendet werden, müssen diese auch eine hinreichende Zugfestigkeit aufweisen. Dazu kommt die Forderung nach einer gewissen Biegsamkeit, die bei den Faserstoffen auf Grund ihrer Struktur als selbstverständlich vorausgesetzt werden kann, eine Annahme, die für Folien nicht so ohne weiteres gegeben ist; denn bei den jetzt verwendeten Triacetatfolien war gerade ihre Sprödigkeit lange der Grund, daß sie als Leiterisolation nicht in Betracht gezogen werden konnten. Durch etwa auftretende Dehnungen dürfen die Eigenschaften dieser Folien oder des Papiers nicht merkbar verschlechtert werden.



Lackdrähte weisen gegenüber den mit anderen z. B. Faserstoffen isolierten Dynamodrähten wohl eine Reihe von Vorteilen auf, müssen dagegen in mancher Hinsicht auch höheren und besonderen Anforderungen genügen, die durch die Natur der Lackisolation selbst bedingt sind.

Bei der Herstellung von Lackdrähten treten nennenswerte Beanspruchungen des Lackes nicht auf; gute Haftfähigkeit auf dem Leitermaterial — Kupfer oder Aluminium — muß verlangt werden. Der Lack selbst darf den Leiter chemisch nicht angreifen. Viskosität und Festkörpergehalt sind so abzustimmen, daß bei genügender Fahrgeschwindigkeit die richtige und gleichmäßige Lackschichtdicke in mehrmaligem Durchführen des Drahtes durch das Lackbad erzielt werden kann. Einbrennungstemperaturen und -zeiten sind nach den Angaben des Lackherstellers genau einzuhalten, da hiervon die Güte der Lackschicht wesentlich abhängt.

Die Sonderanforderungen an Lackdrähten sind im DIN VDE-Blatt 6450 zusammengefaßt. Allerdings genügen diese Normen, die für die Verwendung von Lackdrähten allgemein in der Elektrotechnik in ihren wesentlichen Bestimmungen schon 1926 aufgestellt wurden, den speziellen Ansprüchen des Elektromaschinenbaues besonders angesichts der veränderten Rohstofflage in vielen Punkten nicht mehr; auf diese Frage soll später eingegangen werden.

Im Gegensatz zu den ungetränkten, faserstoffisolierten Dynamodrähten, bei denen die Isolation der Abstandshaltung der benachbarten Drähte dient, daher maximal eine Spannungsfestigkeit erzielt, die praktisch durch die Durchschlagspannung einer dem einseitigen Isolationsauftrag entsprechenden Luftstrecke — unter Berücksichtigung der geometrischen Verhältnisse — gegeben ist, wird von der Lackschicht die völlige dichte Bedeckung des Leiters durch einen zusammenhängenden dünnen Film verlangt; dieser hat auch die Aufgaben zu übernehmen, die der Tränkung bei faserstoffisolierten Dynamodrähten zugebracht sind.

Der Isolationsauftrag muß den DIN VDE 6435 genügen; die Lackschicht soll nach DIN VDE 6450 gleichmäßig dicht, gut gebrannt, nicht klebend, blasen- und löcherfrei sein und möglichst gleiche Farbtönung

aufweisen. Der Lackdraht muß bestimmter Biegebeanspruchung und großer Dehnung genügen, ohne daß die Lackschicht aufplatzt. Die Zahl der Isolationsfehler auf vorgeschriebener Drahtlänge darf einen Höchstwert nicht übersteigen. Die Durchschlagsspannung muß vorgegebenen Größen entsprechen und die Feuersicherheit nachgewiesen werden. Eine bestimmte Alterung darf die Biegefähigkeit des Lackdrahtes nicht nachträglich beeinflussen.

Über die Bestimmungen des Normblattes 6450 hinaus verlangt der Elektromaschinenbau eine höhere Alterungsfestigkeit — entsprechend Wärmebeständigkeitsklasse B —, ferner Tränkbeständigkeit unter gleichzeitiger Druck- und Wärmebeanspruchung gegen übliche Lösungsmittel, z. B. Spiritus, Benzol, Alkohol, Treibstoffgemisch od. dgl., außerdem besonders gegen erhitzten Imprägnierlack. Isolationswiderstand und Durchschlagsspannung dürfen unter der Einwirkung von Feuchtigkeit nicht allzusehr absinken. Eine hinreichende Lagerfähigkeit muß verlangt werden.

Der fertig isolierte Draht soll all die Eigenschaften aufweisen, die eine gute und sichere Verarbeitung in der Wickerei ermöglichen und die ihn in die Lage setzen, nach Fertigstellen der Maschine beim Betrieb den dann auftretenden Beanspruchungen möglichst lange zu widerstehen. In der Praxis hat sich gezeigt, daß die Beanspruchungen des Drahtes gerade bei der Herstellung der Wicklung durch unsachgemäße, aber auch oft unvermeidbare Behandlung so groß sein können, daß die Isolation schon bei der ersten Spannungsprüfung versagt oder nach kurzzeitigem Betrieb zerstört wird. Im einzelnen können beim Wickeln die im folgenden genannten Beanspruchungen mit den angegebenen Folgen sich ergeben:

Bei handgeformten Wicklungen treten insbesondere bei den sogenannten Fädelwicklungen starke Schabe- und Reibebeanspruchungen der Isolierschicht des Drahtes auf. Dadurch kann die Isolationsschicht an einzelnen Stellen ganz oder teilweise zerrieben werden. Bei Faserstoffen oder auch bei Foliendrähten wird sich beim Bruch des Fadens oder der Folie der Draht bei weiteren gleichartigen Beanspruchungen leicht abisolieren. Wenn die Zerstörung nicht gleich festgestellt und beseitigt wird, also in die fertige Maschine mit eingewickelt wird, ist es möglich, daß auch die Prüfung noch ohne

Anstände verläuft, da mit großer Wahrscheinlichkeit nicht gerade die Isolation von zwei aneinanderliegenden Drähten an derselben Stelle zerstört sein wird. Aber die Isolation der Drähte gegeneinander hat an solchen Stellen nur noch die halbe vorgesehene Stärke; sie erhält dann oft gerade durch die hohe Prüfspannung den letzten Anstoß zur vollständigen Zerstörung, so daß beim Betrieb nach kurzer Zeit ein Windungsschluß auftritt, der schließlich zur vollständigen Zerstörung der Wicklung führt. Wenn die Isolation, besonders die Faserisolation, nicht fest um den Draht gesponnen wurde, kann sich die Isolation durch die Reibebeanspruchung an einzelnen Stellen leicht verschieben, so daß eine Schwächung der Isolationsschicht eintritt oder bei einfacher Bespinnung der blanke Draht selbst sichtbar wird.

Schlagbeanspruchungen der Leiterisolation treten auf, wenn bei Träufelwicklung oder beim Formen der Spulenköpfe von Hand die einzelnen Drähte durch Klopfen auf Ebonitstäbe oder auch direkt mit einem Holz- oder Gummihammer in die richtige Lage gebracht werden. Dies führt bei zu starkem Schlagen und unsachgemäßem Arbeiten schnell zur Zerstörung der Isolationsschicht mit ähnlichen Folgeerscheinungen wie vorhin erläutert. Bei Unachtsamkeit und Arbeiten mit langen Drahtstücken, z. B. bei Fädelwicklung, können sich Schlingen im Draht bilden, die beim Anziehen des Drahtes so eng zusammengezogen werden, daß bei lack- oder folienisoliertem Draht der Lack bzw. die Folie aufplatzen.

Bei maschinengewickelten Spulen ergeben sich durch Störungen in der Wickelmaschine, dann bei nicht seitengleichen Profilen der Spulen, z. B. rechteckförmigen Polspulen, und durch die damit verbundene ungleichförmige Umfangsgeschwindigkeit starke Dehnungen der Drähte, die so groß sein können, daß sie zum Bruch des Drahtes selbst führen. Durch diese Dehnungen darf die Isolation nicht leiden. Bei Faserstoff- und Folienisolation bedingt die Verlängerung des Kupferdrahtes an sich keine allzugroße Beanspruchung der Isolation. Anders ist es für den Fall, daß die Isolation fest mit dem Leitermaterial verbunden ist, z. B. beim Lack und bei Glasgarn, wenn dieses wie üblich zur Sicherung gegen Gleiten auf dem blanken Draht mit Kleblack verarbeitet wird. Dann muß das Isoliermaterial

die auftretenden Dehnungen — in DIN VDE 6450 sind für Lack 25% angegeben — ohne merkliche Schädigung aushalten.

Sollte sich diese Dehnung als unerfüllbar für einen sonst geeigneten Isolierstoff herausstellen, wäre zu versuchen, eine Verminderung der Dehnung durch Angleichung der Wickelmaschinen zu erreichen. Durch Vorspannen und Führen des Drahtes wird dieser außerdem stark auf Reibung beansprucht.

2. Nutisolation. Ähnliche Beanspruchungen wie bei der Umspinnung und beim Wickeln der Drähte treten auch bei der Herstellung von Nutisolationen auf, zunächst bei der Fertigisolierung gewickelter Schablonenspulen, dann aber bei der Fabrikation von Nutisolierhülsen. Der hierzu meist verwendete Werkstoff ist Lackpapier oder ein Glimmer-Papiererzeugnis. Da diese mit einer gewissen Spannung um die Spule oder einen Dorn gewickelt werden müssen, um die nötige Gleichmäßigkeit in der Stärke zu erhalten und Luft einschüsse zu vermeiden, muß das Material eine bestimmte Zugfestigkeit besitzen. Dadurch ist die Dicke des Trägerstoffes, meist Papier, vorgeschrieben. Der als Klebe- und Isoliermittel in nur geringen Prozentsätzen verwendete Lack muß zunächst neben guten elektrischen Eigenschaften hohe Klebkraft aufweisen. Er erhält diese allerdings erst durch Trocknung bei bestimmter Temperatur, die so niedrig sein muß, daß der Trägerstoff nicht in Mitleidenschaft gezogen wird. Der Kleblack darf weiter den Trägerstoff nicht chemisch angreifen.

Beim Einlegen der fertig umpreßten Spulen in die Nuten treten besonders, wenn die Nutwände durch ungenaues Stanzen oder Schichten der Bleche nicht eben sind, starke Reibebeanspruchungen der äußeren Isolation auf. Man hilft sich dadurch, daß man zur Auskleidung vorher einen dünnen Preßspanstreifen einlegt. Aus dem gleichen Grund werden zwischen Nutisolation und Nutverschlußkeil sogenannte Rutschstreifen eingelegt, die die Nutisolation vor Beschädigungen schützen sollen, die sich sonst beim Einschlagen des Keiles leicht ergeben würden. Die Hülsen, die bei halb- oder ganz geschlossenen Nuten bei hoher Spannung als Nutisolation Verwendung finden, werden meist ohne Zwischenlage von Gleitstreifen ein-

geschoben. Sie müssen dann sehr genau gearbeitet sein, damit einerseits Luftschichten, das sogenannte Spiel, zwischen Eisen und Nutisolation wegen der unten angegebenen Gründe möglichst vermieden werden, andererseits doch größere mechanische Beschädigungen bei zu starker Hülse nicht auftreten. Damit die Hülsenwände in genauen Dicken herstellbar sind, dürfen die dazu verwendeten Isolierstoffe eine gewisse Mindestdicke nicht überschreiten. Wenn die Nutisolation, wie bei Niederspannungsmaschinen, aus ein oder mehreren ineinander geschobenen und dann eingelegten Streifen hergestellt wird, sollen diese Streifen sich der Nutform weitgehend anpassen, damit keine zu großen Luftzwischenräume entstehen. Dazu dürfen diese Streifen nicht zu steif sein, müssen also eine gewisse Biegsamkeit und Falzfähigkeit besitzen, daß sie z. B. bei rechtwinkliger Knickung nicht brechen. Dagegen dürfen die Streifen auch nicht zu weich sein; denn die Nutisolation soll aus elektrischen Gründen je nach der Größe der Spannung aus der Nut mehr oder weniger herausragen; insbesondere darf sie am Nutaustritt nicht geknickt, abgebogen oder gebrochen sein, da gerade an dieser Stelle die größte elektrische Beanspruchung der Isolation auftritt.

Die Wickelkopfisolation der Einlegespulen wird meist auf Umbandelmaschinen hergestellt. Die Gewebe- oder Glimmer-Papierbänder, die dazu Verwendung finden, müssen dem dabei erforderlichen und auftretenden Zug gewachsen sein. Die Wickelkopfisolation soll möglichst fest auf der Wicklung aufgebracht werden, um weitgehend alle Luftzwischenräume, die für eine gute Wärmeableitung schädlich sind, zu vermeiden. Zum Schutz gegen Angreifen durch chemische Stoffe und Dämpfe erhält die Außenlage der Wickelkopfumbandlung vielfach einen besonderen Überzug mit Schutzlack, von dem verlangt werden muß, daß er gegen chemische Einflüsse weitgehend immun ist.

Beim Löten der Drähte darf die Isolation durch die mehr oder weniger hohen Temperaturen, die in der Umgebung der Lötstelle auftreten, nicht zerstört werden. Diese Forderung nach Temperaturbeständigkeit, die bei der Tränkung der Wicklung und beim späteren Betrieb der Maschine noch verschärft auftritt, soll dort genauer untersucht werden.

Die meisten organischen Faserstoffe sind hygroskopisch, d. h. sie nehmen abhängig von der Feuchtigkeit der umgebenden Luft selbst in kurzer Zeit eine bestimmte Menge Wasser in sich auf. Diese Wasseraufnahme verschlechtert die elektrischen Eigenschaften der genannten Stoffe so sehr, daß sie bei größerer Luftfeuchtigkeit als elektrische Isoliermittel nicht mehr brauchbar sind. Durch in der Maschine auftretendes Kondenswasser, besonders in feuchtigkeithaltigen Räumen, wäre eine Isolation mit derartigen Faserstoffen nicht möglich, wenn man die Wasseraufnahme nicht verhindern oder herabsetzen könnte. Eine Erscheinung, die zu ähnlichen Unzuträglichkeiten führt, ist die, daß manche, insbesondere einige anorganische Stoffe dazu neigen, auf ihrer Oberfläche dünne Feuchtigkeitsschichten festzuhalten, wie z. B. Asbest, Glas, Eloxal u. dgl.

Um sich wirksam gegen diese Nachteile der Neigung zur Feuchtigkeitsaufnahme schützen zu können, sind Versuche unternommen worden, die Aufschluß geben sollten über Aufbau der hygroskopischen Stoffe und Zusammenhänge bei der Wasseraufnahme. Jedoch scheinen die Untersuchungen noch keine endgültige Klarheit gebracht zu haben, da teilweise sich widersprechende Ergebnisse vorliegen. Nach Stäger [2] bestehen die Faserstoffe aus Teilen von kristalliner Struktur, die durch eine amorphe Kittmasse zusammengehalten werden. Diese Kittmasse ist im allgemeinen quellbar und kann den Hauptteil des Gesamtwassergehalts der Faser aufnehmen. Außerdem wird noch Feuchtigkeit in den Kapillaren zwischen den einzelnen Faserteilen festgehalten. Diese Kapillarräume können je nach dem Quellungszustand der Fasern verschieden groß sein und werden daher auch verschieden große Anteile des Wassergehalts übernehmen.

Bei elektrischer Beanspruchung dieser Fasern sind nun verschiedene Erscheinungen möglich. Durch das Vorhandensein von Elektrolyten tritt in den Kapillarräumen eine bestimmte elektrische Leitfähigkeit auf. Es ist festgestellt worden, daß diese von der Spannung abhängt. Nach Versuchen von Eveshed [2] hat sich ergeben, daß der Querschnitt der Wasserschicht bei Anlegen einer Spannung dicker wird, so daß sich der Widerstand dieser Wasserhaut bei größeren Spannungen verringert. Die Richtigkeit dieser Annahme wurde an Modellversuchen bestätigt.

Bei Papier läßt sich Ähnliches feststellen. Nach Porvik [2] sind drei Arten der Wasseraufnahme zu unterscheiden:

1. Kapillarwasser in den Zwischenräumen,
2. Kapillarwasser in den Hohlräumen,
3. Wasserschichten an der Oberfläche der Fasern.

Auch Lacke zeigen zuweilen Quellungserscheinungen, wenn sie starken Luftfeuchtigkeiten ausgesetzt sind. Durch Lösung von irgendwelchen Salzen, die im Lack vorhanden sind, kann zunächst Ionenleitung und damit ein Abnehmen des Isolationswiderstandes eintreten. Jedoch liegen hierüber noch keine endgültigen Versuchsergebnisse vor.

Es ist einleuchtend, daß durch die Wasseraufnahme auch die elektrische Durchschlagfeldstärke herabgesetzt wird. In unbehandeltem Zustand sind daher hygroskopische Stoffe nicht brauchbar zur Isolation. Durch Trocknen kann man zwar die Feuchtigkeit entfernen, aber sie wird nach dem Trockenprozeß wieder aufgenommen. Man hilft sich dadurch, daß man die Faserstoffe nach der Trocknung in einem flüssigen Isolierstoff tränkt. Dieser Isolierstoff soll die Kapillaren ausfüllen. Bei einem derartig getränkten Stoff übernimmt also das Imprägniermittel die Isolation und die Faserstoffe sind nur die Träger dieser Isolation. Damit der flüssige Isolierstoff, meist ein Lack, in alle Poren und Kapillaren eindringen kann, muß er einen bestimmten Grad der Dünflüssigkeit haben. Die im Lack als eigentliche Isolation befindlichen Stoffe müssen in genügender Feinheit aufgelöst sein, da es sonst vorkommen kann, daß nur das Lösungsmittel des Lackes in die Hohlräume Eingang findet und bei der Trocknung wieder verdunstet, so daß auch die Feuchtigkeit wieder in die frei gewordenen Hohlräume eindringt. Es darf auch nicht so sein, daß ein großer Teil des Lackes beim Trocknen verdunstet; denn dann kann es vorkommen, daß die Hohlräume nach der Trocknung nur teilweise ausgefüllt sind und somit auch wieder Feuchtigkeit aufnehmen.

Nach Versuchen von Michailow [3] allerdings soll es überhaupt unmöglich sein, die Faserstoffe durch Tränkung auf die Dauer unhygroskopisch zu machen. Er hat festgestellt, daß auch getränkte

Faserstoffe nach längerer Zeit wieder Feuchtigkeit aufnehmen und in Verbindung damit schließlich schlechte dielektrische Eigenschaften aufweisen. Die Imprägnierung hätte nur den Zweck, die Wasseraufnahme zu verlangsamen. Stäger [2] erklärt diese Erscheinung dahin, daß die Imprägniermittel selbst hygroskopisch sind und daß sich an den Oberflächen: Imprägniermittel—Cellulose feine Wasserhäutchen bilden können, die zur Stromleitung, wie oben besprochen, beitragen.

Für die Tränklacke ergeben sich aus dem Obigen also folgende Forderungen: Außer guten elektrischen Eigenschaften sollen sie eine möglichst gleichmäßige und feine Lösung des Lackbildners aufweisen, unhygroskopisch sein und bei der Trocknung nicht schrumpfen. Sie dürfen weiter die Faserstoffe oder sonstige zu tränkende Isolierstoffe sowie das Leitermaterial chemisch nicht angreifen und ihre Trocknungstemperatur soll nicht so hoch liegen, daß die Trägerstoffe dauernd geschädigt werden. Sie sollen ferner eine gute Tiefentrocknung besitzen, d. h. der Tränklack soll in allen Schichten gut durchtrocknen. Es kann nämlich vorkommen, daß der Lack nur an der Oberfläche trocknet und so eine abschließende Schicht bildet, die das Lösungsmittel in den tieferen Schichten nicht mehr durchdringen läßt, so daß der Lack hier weich bleibt und z. B. bei umlaufenden Wicklungen herausgeschleudert wird; damit geht dann die Auswuchtung des Ankers verloren und die Maschine läuft unruhig, eine Beobachtung, die häufig bei schnellaufenden Kleinstmaschinen in der Fabrikation zu einem hohen Ausschußsatz führt. Durch geeignete Trockentemperaturen kann diese Gefahr meist behoben werden. Aus wirtschaftlichen Gründen soll die Trocknungszeit der Tränklacke durch Verwendung geeigneter Lösungsmittel so kurz wie möglich gehalten werden.

Bei Stoffen, die an der Oberfläche dünne Wasserhäute haben, müssen diese erst durch Erhitzen entfernt und die Oberfläche dann mit einem wasserabweisenden Mittel, meist auch wieder einem Lack, überzogen werden. Oft werden auch die getränkten Spulen an den der Außenluft zugänglichen Stellen noch einmal mit einem Schutzlack bedeckt, der außer vor Feuchtigkeit unter Umständen auch vor etwaigen der Wicklung schädlichen Dämpfen oder je nach den



Arbeitsbedingungen verschiedenen chemischen Angriffen schützen soll. Diese Schutzlacke, die nur auf der Oberfläche der Isolierstoffe sitzen, müssen dann diesen chemischen Beanspruchungen standhalten.

Eine weitere Erscheinung, die schon bei der Herstellung der Spulen berücksichtigt werden muß, ist die des Glimmens, das von bestimmten Feldstärken an auftritt. In Abb. 2 [4] ist die Grenze des

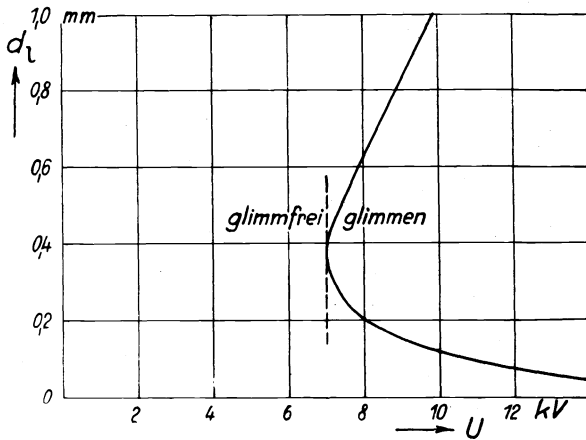


Abb. 2. Glimmgrenze in Abhängigkeit von der Luftschichtstärke  $d_l$  und Spannung  $U$ .

Glimmens, abhängig von der Maschinenspannung  $U$  und der Stärke der Luftschicht  $d_l$  angegeben. Mit dem Glimmen ist Ozonbildung verbunden. Da Ozon eine sehr reaktionsfähige Verbindung darstellt, ist es nicht ausgeschlossen, daß es durch chemische Reaktion die organischen Isoliermaterialien zerstört. Durch Feuchtigkeitzutritt könnte sich ebenso Salpetersäure bilden. Die Erfahrungen über die Schädlichkeit des Ozons sind allerdings nicht einheitlich. Man hat bei Hochspannungsmaschinen Anstände gehabt, die als Folgen des Glimmens angesehen wurden; dem entgegen steht die Feststellung, daß Maschinen, die Glimmerscheinungen zeigten, normale Lebensdauern aufweisen. Es scheint demnach, daß die Gefährlichkeit des Glimmens oft überschätzt wird.

Die am meisten gefährdeten Stellen der Trommelwicklungen sind Nutaustritt und Haltestellen der Wickelköpfe, da sich hier leicht

inhomogene elektrische Felder mit so hohen örtlichen Feldstärken ausbilden, daß die elektrische Festigkeit überschritten wird und Glimmen oder gar Gleitfunken auftreten. Durch besondere Schutzeinrichtungen können diese Felder homogenisiert und Glimmerscheinungen vollkommen unterdrückt werden. Im Inneren der Nut wird bei Hochspannungsmaschinen außer einem Glimmschutz durch halbleitende Stoffe die Wicklung kompondiert, d. h. es werden möglichst sämtliche Lufteinschlüsse durch eine Füllmasse, meist ein Asphalterzeugnis, ausgetrieben. Wenn diese Arbeit sorgfältig durchgeführt wird, so daß alle Lufteinschlüsse verdrängt sind, kann Glimmen, das ja nichts anderes darstellt als partielle Luftdurchschläge, nicht mehr auftreten. Hieraus ergibt sich für diese Füllmittel die Forderung, daß sie bei elektrisch guten Werten in warmem Zustand dünnflüssig genug sind, um in alle Zwischenräume eindringen zu können. Dabei darf die Verflüssigungs- und Trockentemperatur nicht so hoch liegen, daß die übrige Isolation beschädigt wird. Das Füllmittel darf beim Erstarren nicht schrumpfen; es soll die Isolation ferner nicht chemisch angreifen und gleichzeitig unhygroskopisch sein.

Die fertig gewickelte, imprägnierte und etwa kompondierte Maschine muß nach den VDE-Bestimmungen verschiedenen Spannungsprüfungen unterworfen werden. Die hierzu vorgeschriebenen Prüfspannungen liegen zum Teil bedeutend höher als die Nennspannung, um im Betrieb die Gewähr zu haben, daß bei betriebsmäßigen Überspannungen die Maschine nicht zerstört wird. Diese Spannungsprüfungen bedeuten eine starke Belastung für die Isolation und geben keine Sicherheit, daß bei einer zweiten Prüfung die Isolation nicht doch durchschlägt. Es ist denkbar und hat sich auch praktisch gezeigt, daß durch diese Spannungsprüfung partielle Durchschläge in der Isolation auftreten, die die Isolation dauernd schwächen und daß im späteren Betrieb selbst ohne Auftreten von Überspannungen nach kurzer Zeit eine endgültige Zerstörung eintritt.

Die fertige Maschine kann durch Lagerung in feuchten Räumen oder beim Transport Feuchtigkeit aufgenommen haben. Es empfiehlt sich daher, insbesondere für Hochspannungsmaschinen, diese vor der ersten Inbetriebnahme auszutrocknen, ehe die volle Spannung

angelegt wird. Diese Trocknung geschieht durch Zufuhr von vorgewärmter Luft oder durch Anheizung der Maschine mittels Verlustwärme, die mit einem passenden Bruchteil der Nennspannung erzeugt wird. Das Fortschreiten der Trocknung kann durch Messen des Isolationswiderstandes, der vom Feuchtigkeitsgehalt der Isolation abhängig ist, auf einfache Weise verfolgt werden.

Beim Betrieb der Maschine wird die Isolation der Spulen je nach Höhe der Nennspannung und Art der Wicklung mehr oder weniger elektrisch beansprucht. Bei Niederspannungsmaschinen ist diese Beanspruchung verhältnismäßig gering, da aus mechanischen Gründen die Isolation nicht so dünn gemacht werden kann, wie es elektrisch zulässig wäre. Dagegen ist bei Hochspannungsmaschinen die elektrische Beanspruchung vorherrschend. Durch die stark inhomogenen elektrischen Felder und durch den inhomogenen Aufbau der Isolation ist die elektrische Beanspruchung an verschiedenen Stellen der Maschine und innerhalb der Isolation selbst großen Schwankungen unterworfen; dadurch ist, insbesondere bei sogenannten Höchstspannungsmaschinen, eine Überdimensionierung der Isolation nötig, die sich allerdings durch geeignete Maßnahmen, auf die später eingegangen werden soll, in etwa ausgleichen läßt.

Erhöhte elektrische Beanspruchung tritt auf, wenn Wanderwellen bei direktem Anschluß des Hochspannungsnetzes in die Maschine eindringen. Diese werden bei ihrem Auftreffen auf die Maschinenwicklung stark gedämpft, so daß nicht die ganze Wicklung, sondern im wesentlichen nur deren Anfänge dieser elektrischen Stoßbeanspruchung ausgesetzt sind.

Die in den Leitern entstehende Verlustwärme, deren Größe von der Stromdichte abhängt, ist mit einer Temperatursteigerung verbunden, wobei die Temperatur proportional ist der erzeugten Wärmemenge und dem Wärmewiderstand zwischen Leiter und Kühlmittel. Da hohe Temperaturen mit der Zeit auf alle physikalischen Eigenschaften der Isoliermaterialien einen ungünstigen Einfluß haben, soll die Temperatur möglichst niedrig sein. Die erzeugte Wärmemenge in der Wicklung und im Eisen ist aber gegeben durch die Beanspruchung des aktiven Materials. Die Ausnutzung soll nun, soweit es der Wirkungsgrad zuläßt, möglichst hoch sein; damit wird auch die

erzeugte Wärmemenge groß. Eine Erniedrigung der Temperatur ist zu erreichen durch Erhöhung der Wärmeleitfähigkeit. Im allgemeinen sind die organischen Isolierstoffe ebenso wie die Luft schlechte Wärmeleiter. Eine bessere Wärmeleitfähigkeit in der Nut kann daher erzielt werden, wenn die Lufteinschlüsse mit besser wärmeleitenden Stoffen, z. B. Asphalt, ausgefüllt werden; man erreicht durch die Kompoundierung, die aus den oben besprochenen Gründen erforderlich war, also einen weiteren Vorteil: den der besseren Wärmeleitfähigkeit. Es ist vorgeschlagen worden, die Wärmeleitfähigkeit der Füllmassen durch Zusatz feiner Quarzkristalle zu erhöhen [5]; jedoch besteht dann leicht die Gefahr, daß das Tränkmittel nach der Trocknung dadurch spröde wird und Risse bekommt, die die Tränkung illusorisch machen würden. Durch Verwendung von anorganischen Isolierstoffen, die im allgemeinen eine bessere Wärmeleitfähigkeit als organische aufweisen, wird eine günstigere Ableitung der Wärme ermöglicht, und damit die Temperatur herabgesetzt. Besonders vorteilhaft dürften sich in dieser Hinsicht eloxierte Aluminiumfolien verhalten, soweit es gelingt, diese ohne Luftzwischenräume dicht aufeinander zu wickeln. Der Widerstand kann, wenn man dazu auch die Wärmeabgabe rechnet, durch verschiedene Kühlanordnungen weiter herabgesetzt werden.

Es lassen sich zwei Arten der Temperaturbeanspruchung unterscheiden. Bei der einen stellen sich die Folgen der Temperaturerhöhung sofort ein; bei der anderen ist eine gewisse Zeit nötig, bis sich die Folgen zeigen. Unmittelbar wirken sich Temperaturerhöhungen auf elektrische Eigenschaften der meisten Isolierstoffe aus. So nehmen Isolationswiderstand und Durchschlagfestigkeit mit wachsender Temperatur mehr oder weniger ab. Eigentümlicherweise ist diese Frage bisher wenig behandelt worden, obwohl einzelne Untersuchungen starke Einbußen an Durchschlagfestigkeit in Abhängigkeit von der Temperatur erkennen lassen. Darnach ist die Forderung der REM, die Prüfung auf Isolierfestigkeit möglichst im warmen Zustande der Maschinen vorzunehmen, nur zu berechtigt.

Es ist bekannt, daß die Cellulose, der Grundstoff für die wohl am meisten verwendeten Isolierstoffe: Baumwolle, Papier, Zellwolle, bei Temperaturen, die über 110° C liegen, mehr oder weniger schnell

zerstört wird. Worauf diese Zerstörung des näheren beruht, ist wohl nicht ganz geklärt; nach der einen Ansicht nimmt man eine Oxydation an; doch konnte Oxycellulose bisher nicht nachgewiesen werden; andererseits haben Erwärmungen bei Abwesenheit von Sauerstoff, z. B. in Stickstoff, gewisse Unterschiede des Verhaltens gegenüber den in Luft erhitzten Proben gezeigt. Bei Natur- und Kunstharzen, sowie den aus ihnen hergestellten Lacken kann wohl auch nicht mit Sicherheit angegeben werden, worauf die Änderung der Eigenschaften bei längerer Erwärmung beruht. Anorganische Stoffe, wie Glimmer, Asbest und Glas sind diesen Folgeerscheinungen für die in Frage kommenden Temperaturen fast gar nicht unterworfen. Man nennt diese Erscheinung, also die Änderung der Eigenschaften abhängig von Temperatur und Zeit allgemein das „Altern“ des Stoffes. Bei genauerer Untersuchung zeigt sich nun, daß die verschiedenen physikalischen Eigenschaften sich in mehr oder weniger starkem Maße mit Temperatur und Zeit ändern. Es hat sich z. B. bei Papier ergeben, daß die Abnahme der Zugfestigkeit prozentual geringer ist als die Festigkeit gegen Zerreißen, und die Dehnung wiederum anders abnimmt. Allgemein kann man wohl sagen, daß die mechanischen Eigenschaften der Isolierstoffe ungünstig durch eine Dauerwärmebeanspruchung beeinflußt werden. Die Stoffe verlieren ihre ursprüngliche Zugfestigkeit, die Dehnung wird geringer, die Stoffe werden spröde und brüchig. Bei Lackdrähten kann die Härte der Isolierschicht zunehmen, dafür wird sie aber auch spröde und rissig. Bei Biegebeanspruchung des Drahtes platzt sie auf und blättert ab. Kleblacke verlieren ihre Klebkraft.

Über das Verhalten der elektrischen Eigenschaften, wie Isolationswiderstand und Durchschlagspannung, bei Alterungsbeanspruchungen liegen nur wenige Messungen vor; nach eigenen Versuchen nimmt die Durchschlagspannung bei genügender Alterung ab; damit zeigen auch diese elektrischen Eigenschaften grundsätzlich das gleiche Verhalten wie die mechanischen Größen, z. B. Zugfestigkeit, Dehnung usw. Wenn verschiedentlich die Meinung auftauchte, die elektrischen Eigenschaften verhalten sich bei Alterung anders als die mechanischen Eigenschaften, so ist dies ein Irrtum, der auf Messungen von zu geringer Dauer beruht. Bei eigenen Alterungsversuchen konnte

z. B. an Lackdrähten festgestellt werden, daß sich anfangs sogar eine Steigerung der Werte der Durchschlagspannung einstellte, während gleichzeitig die Dehnung erheblich abnahm. Erst bei bedeutender Ausdehnung der Versuchsdauer war ein Nachlassen der Durchschlagspannung zu messen.

Einen Schutz gegen die Folgeerscheinungen des Temperatureinflusses gibt es nur durch Herabsetzen der Temperatur.

Maßgebend für die zulässige Erwärmung ist die maximale, in der Maschine festgestellte, nicht die mittlere, durch Widerstandsmessung gefundene Temperatur. Dies wird in den REM durch die dort vorgeschriebenen verschiedenen Meßverfahren und verschiedenen zulässigen Temperaturen berücksichtigt.

Wie Versuche ergeben, hat eine Temperaturerhöhung selbst von nur einigen Graden auf die Dauer eine erhebliche Verkürzung der Lebensdauer der Isolation zur Folge. Da Kurzschlüsse, auch wenn sie nur sehr kurze Zeit dauern, eine bedeutende Temperatursteigerung über längere Zeit verursachen, schwächen sie die Isolation in starkem Maße.

Eine andere unangenehme Folge der Erwärmung ist das Quellen der geschichteten Isolationen, soweit sie mit Klebemitteln versetzt sind; es wird hervorgerufen durch Gasentwicklung der Klebstoffe und äußert sich bei Schellack stärker als bei Asphaltlack.

Diese Erscheinung wirkt sich besonders gefährlich in den Lüftungsschlitten der Maschine aus, da dort die Isolation Platz hat, dem Quellungsdruck nachzugeben; es bilden sich Risse und Luftzwischenräume in der Isolation [4].

Weitere Einwirkungen, die für die Isolation schädlich sind und nur von der Temperatur abhängen, ergeben sich aus folgenden Gründen:

Durch die verschiedene Wärmedehnung von Eisen, Isolation und Kupfer reißt die Isolation an der Nutwand und am Leiterkupfer, wenn die Maschine Temperaturschwankungen, d. h. Lastschwankungen unterworfen ist. Dies Scheuern macht sich besonders stark an den meist scharfen Kanten der Nutaustritte bemerkbar, also gerade an den Stellen, die auch elektrisch besonders hoch beansprucht sind.

Zeigt dann die Isolation in den Kühlschlitzen noch Quellungen, wird diese Reibung noch besonders verstärkt. Da sich, wie oben angegeben, durch erhöhte Temperatur auf die Dauer ein Spröderwerden des Isoliermaterials feststellen läßt, wird die Gefahr der Zerstörung mit der Zeit immer größer. Es ist schon die Ansicht geäußert worden, daß diese Folgeerscheinungen des Scheuerns, das mit zunehmender Temperatur infolge größerer Dehnung immer mehr zunimmt, die zulässige Temperatur in einer elektrischen Maschine in erster Linie begrenzen dürfte; erst wenn es gelänge, die verschieden große Dehnung von Eisen, Isolation und Kupfer durch geeignete Kühlanordnungen zu egalisieren, könne daran gedacht werden, mit höheren als bisher üblichen Temperaturen zu arbeiten.

Gegenüber den feststehenden Wicklungen, z. B. Statorwicklungen von Asynchronmotoren, treten für die umlaufenden Wicklungen noch besondere Beanspruchungen auf; so müssen die Wickelköpfe der Läufer elektrischer Maschinen gegen Verbiegen unter dem Einfluß der Fliehkräfte durch Bandagen geschützt werden. Diese Bandagen sind mit erheblicher Vorspannung auf die Wickelköpfe aufzubringen. Dadurch wird die Isolation auf Druck beansprucht; sie darf diesem Druck nicht nachgeben, damit sich die Bandage nicht lockert. Durch die Fliehkräfte werden auch in der Nut die Leiter gegeneinandergedrückt, wodurch Druckbeanspruchungen der Isolation auftreten. Wenn die Wicklung die Nut nicht vollkommen ausfüllt, tritt zusätzlich Reibung auf. Durch unruhigen Lauf und sonstige mechanische Erschütterungen der Maschine während des Betriebes werden nicht vollkommen in Füllmasse gebettete Leiter in Schwingungen versetzt und reiben dabei gegeneinander. Es hat sich ergeben, daß durch diese Beanspruchungen die Isolation von Runddraht eckig gepreßt und gerieben wurde.

Maschinen, die starke Kurzschlußströme zu erwarten haben, insbesondere also große Drehstromgeneratoren, sind an ihren Wickelköpfen mit Verkeilungen zu versehen, um diese vor Deformationen bei Kurzschlüssen zu schützen. Die Isolation dieser Stirnverbinder wie auch der Stützkonstruktion und Bandagen muß den Druckbeanspruchungen, die bei Kurzschlußströmen auftreten, gewachsen sein.

### e) Stromwender und Schleifringe

Für die Stromwenderisolation treten zum Teil ähnliche Beanspruchungen auf wie bei der Wicklungsisolation. Zur Isolierung des Stromwenderbelags gegen die Welle werden meist im Schnitt V-förmige Ringstücke, sogenannte Manschetten, benutzt. Bei ihrer Formgebung sind die hierzu verwendeten Isolierstoffe, ähnlich wie bei Nuthülsen, starken Biege- und Falz- sowie Druckbeanspruchungen unterworfen. Um einen festen Sitz des Stromwenders auf der Welle oder Nabe zu gewährleisten, wird die Isolation oft beträchtlichen Pressungen ausgesetzt, die dauernde starke Druckbeanspruchung der gesamten Belagisolation zur Folge haben. Die Spannung, gegen die isoliert werden muß, ist meist gering, so daß die Stärke der Isolation nur durch die mechanische Festigkeit des Isoliermaterials bestimmt wird. Die maximale Temperatur, die aus mechanischen Gründen beschränkt ist, darf nach REM 0530 bestimmte Werte nicht überschreiten. Durch die auftretenden Wärmedehnungen kann die Isolation hier ebenfalls starken Reibebeanspruchungen ausgesetzt sein.

An die Lamellenisolation werden einige Sonderanforderungen gestellt. Sie soll, um einen einwandfreien Aufbau des Kommutators zu gewährleisten, in genauen Dicken herstellbar sein. Da der Stromwender aus mechanischen Gründen unter großem Druck zusammengehalten werden muß, wird von der Lamellenisolation eine große Druckfestigkeit gefordert, die nach VDE 0332 § 7 mindestens  $300 \text{ kg/cm}^2$  bei  $200^\circ \text{C}$  betragen soll. Diese Prüfbestimmungen beziehen sich auf das insbesondere bei großen Stromwendern ausschließlich verwendete Isoliermittel Mikanit. Die Lamellenisolation muß ferner eine gewisse Elastizität besitzen, damit sich eine mechanisch starre Konstruktion auch bei den unvermeidlichen Abweichungen in den Abmessungen von Isolations- und Kupferlamellen ergibt.

Durch das zuweilen auftretende Bürstenfeuer darf die Isolation nicht tiefgehend verbrannt werden; die Verbrennungsrückstände aber sollen möglichst geringe elektrische Leitfähigkeit aufweisen, damit ein schließlich zum Kurzschlußwert anwachsender Übergangstrom zwischen den Lamellen vermieden wird. Wenn der Kommutator



nicht ausgekratzt wird, darf die Abreibfestigkeit des Isolierstoffes nicht größer sein als die des Kupfers, da sonst bei herausragender Isolation der Kontakt der Bürsten mit den Kupferlamellen unterbrochen wird und in Verbindung mit dem Tanzen der Bürsten starkes Feuern des Kommutators die Folge ist. Außerdem würden die Bürsten bei harter und vorstehender Isolation leicht abbrechen und sich dann sehr schnell abnutzen.

Bei Turbokommutatorläufern muß vielfach infolge hoher Umfangsgeschwindigkeit des Stromwenders und der damit verbundenen hohen Fliehkraftbeanspruchung der Lamellen eine Schrumpfkonstruktion verwendet werden. Bei dieser Kommutatorausführung sind die Schrumpfringe, die in heißem Zustand aufgezogen werden, gegen die Lamellen zu isolieren. Die Isolation darf durch die dabei auftretenden Temperaturen und Drücke nicht beschädigt werden.

Bei Schleifringisolationen treten im wesentlichen dieselben Beanspruchungen der Isolation auf, wie bei der Kommutatorisolation, jedoch ohne die Sonderanforderungen, wie diese an die Lamellenisolation zu stellen sind.

#### **d) Blechisolation**

Die elektrische Beanspruchung der Blechisolation ist sehr gering, da die Spannung zwischen den einzelnen Blechen meist nur einige Millivolt nicht überschreitet. Die Isolation kann daher so dünn gemacht werden, wie es aus mechanischen Gründen eben zulässig ist. Wird Papier zur Isolation verwendet, ist die Mindeststärke durch die bei der Herstellung auftretende mechanische Beanspruchung festgelegt. Da es am zweckmäßigsten und auch am billigsten ist, die ungestanzten Blechtafeln zu isolieren, muß die Isolation stanzfest sein, d. h. sie darf sich durch das Stanzen nicht vom Blech lösen. Wenn diese Bedingung etwa in Rücksicht auf die Nutform nicht erfüllt werden kann, müssen die fertig gestanzten Bleche einzeln isoliert werden; dies ist praktisch nur durch die Verwendung flüssiger Isolierstoffe möglich. Die verwendeten Isolierstoffe oder Klebemittel dürfen das Eisen auch bei hohen Temperaturen nicht chemisch angreifen. Die Isolation muß den Pressungsdruck des Blechpaketes ohne Zerstörung aushalten, darf andererseits nach dem Trocknen

nicht so spröde werden, daß sie in Stücken abspringt; sie soll ferner ein möglichst guter Wärmeleiter sein, damit eine gleichmäßige Temperaturverteilung in der Maschine erreicht und die mittlere Temperatur herabgesetzt wird. Da die Wärmeleitfähigkeit mit der Dicke der Isolierschicht abnimmt, soll auch aus diesem Grunde die Isolierschicht möglichst dünn sein. Das Isoliermittel darf außerdem nicht hygroskopisch sein; denn im entgegengesetzten Falle wird die Gefahr, daß das Eisen des Blechpaketes rostet, durch eine derartige Isolierung nur verstärkt. Die Isolation soll mindestens derselben Wärmeklasse angehören, wie die Wicklungsisolation, da gerade das Blechpaket unter dem Einfluß der Eisen- und Wicklungsverluste häufig Temperaturen annimmt, die höher liegen als die der Wicklung.

### III. Prüfungen

Um eine Übersicht über die Brauchbarkeit eines Werkstoffes zu erhalten, muß dieser bestimmten Prüfungen unterzogen werden, die derart beschaffen sein sollen, daß sie eine unmittelbare Übertragung der Prüfergebnisse auf den praktisch vorliegenden Fall der Anwendung gestatten. Die Prüfungen an Isolierstoffen sollten daher möglichst die Verhältnisse nachahmen, wie sie bei der Herstellung und dem Betrieb der elektrischen Maschine auftreten.

Wie aus der vorhergehenden Erläuterung der möglichen und wirklichen Beanspruchungen hervorgeht, ist es in den meisten Fällen unmöglich, die Größe der Beanspruchungen zahlenmäßig zu erfassen. Man wird also bei der Beurteilung der Ergebnisse stets auf einen Vergleich mit schon bekannten und mehr oder weniger bewährten Stoffen angewiesen sein. Absolute Zahlenwerte in üblichen Maßeinheiten interessieren nur insofern, als sie eine Vergleichsmöglichkeit mit anderen bekannten und in der Praxis erprobten Stoffen bieten. Es würde also beispielsweise genügen, den Isolationswiderstand von zu prüfenden Faserstoffen durch die Entladezeit eines Elektrometers in Sekunden anzugeben, wenn zum Vergleich der betreffende Wert von Baumwolle als bekanntem Werkstoff mitangegeben wird. Um solchen Messungen einen bleibenden Wert zu sichern, sollten diese Prüfungen jederzeit reproduzierbar sein; es wäre erwünscht, daß in Berichten über derartige Prüfungen die Versuchsbedingungen genau angegeben würden, um die Ergebnisse gegebenenfalls nachprüfen oder ergänzen zu können. Dies ist leider in sehr vielen älteren Schrifttumsangaben über Isolierstoffprüfung nicht geschehen.

Allgemeingültige, besonders auf den Elektromaschinenbau zugeschnittene Prüfungen von Isolierstoffen sind bisher nicht bekanntgeworden. Dagegen existiert eine große Anzahl von Bestimmungen über Prüfungen an Isoliermaterialien, die in ihrer Gesamtheit einen

guten Überblick über deren physikalisch-technische Eigenschaften ermöglichen. Es kann hier nicht Aufgabe sein, diese Prüfungen im einzelnen zu beschreiben. In einigen Tafeln, XIV a—c, sollen daher die genormten und bewährten Prüfungen aufgeführt werden<sup>1)</sup>. Für die Durchführung sei außer auf die betreffenden Normen auch auf das einschlägige Schrifttum verwiesen.

Zusammengestellt sind die Prüfungen der elektrischen, mechanischen und chemischen Eigenschaften der für die Verwendung im Elektromaschinenbau in Betracht kommenden Isolierstoffe, soweit diese durch die VDE-Bestimmungen unter Gruppe 3 erfaßt sind. Die Ermittlung weiterer allerdings hier weniger interessierender Eigenschaften, wie Raumgewicht, spezifisches Volumen, Elastizitätsmodul, Bearbeitbarkeit ist meist einfach durchzuführen; es genügt, auf die einschlägige Literatur und die dort angegebenen Tabellen hinzuweisen, die auch chemische Beständigkeitsprüfungen gegen eine Reihe von Reagenzien, soweit diese in der nachstehenden Tafel nicht aufgeführt sind, behandelt. In diesem Zusammenhang seien auch die „Leitsätze für die Erzeugung bestimmter Luftfeuchtigkeit zur Prüfung elektrischer Isolierstoffe“ VDE 0308/1929 mit den Normalstufen 65% und 80% relative Feuchtigkeit erwähnt. Die Prüfung von Fertigfabrikaten, z. B. Lackdrähten, soll später unter dem betreffenden Abschnitt behandelt werden.

Einige wichtige Eigenschaften sind noch nicht durch besondere Prüfungen berücksichtigt, wie der Vergleich der in den Tafeln aufgeführten Prüfungen mit den vorher besprochenen, auftretenden Beanspruchungen zeigt. Bei den mechanischen Eigenschaften ist hier die Reib- oder Scheuerfestigkeit zu nennen. In der Literatur ist ein Verfahren beschrieben worden, das sich besonders für Lackdrähte eignet [6]. Darnach schleift ein mit einem Gewicht belasteter Draht auf einer aus einzelnen Eisenstäben gebildeten Walze, deren Umdrehungen gezählt werden, bis die Isolation durchgescheuert ist. Wie eigene umfangreiche Versuche ergaben, hängen die Ergebnisse, wie auch zu erwarten, stark von der Oberflächenbeschaffenheit der Stäbe ab, so daß darüber besondere Angaben nötig wären. Die

---

<sup>1)</sup> Siehe S. 144/145.

Abreibfestigkeit von Eloxalschichten wurde nach einem ähnlichen Verfahren schon früher [7] geprüft. Alle diese Prüfungen ergeben keine absoluten Zahlenwerte; es ist daher notwendig, zum Vergleich Werte bekannter Stoffe anzugeben.

Weitere für den Elektromaschinenbau äußerst wichtige Prüfungen sind die der thermischen Eigenschaften. Neben den physikalischen Konstanten, wie spezifische Wärme, Wärmedehnzahl und der wichtigen Größe der Wärmeleitfähigkeit, deren Messung nach bekannten Verfahren erfolgen kann, interessiert den Elektromaschinenbauer insbesondere die Wärmefestigkeit oder Alterungsbeständigkeit

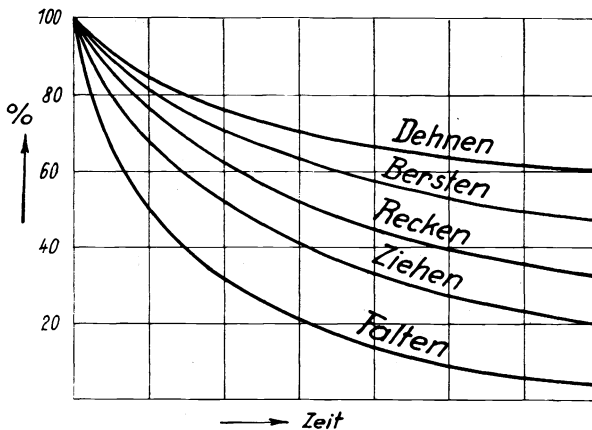


Abb. 3. Abnahme mechanischer Eigenschaften elektrischer Isolierstoffe bei Alterung.

bei höheren Temperaturen, da mit dieser Frage, wie eingangs ausgeführt, die Ausnutzung der aktiven Baustoffe der Maschine eng verbunden ist. Die in DIN VDE 6450 vorgeschriebene Prüfung von Lackdraht nach einer Erwärmung von 3 Stunden bei 100 bzw. 120° C läßt keine Rückschlüsse zu auf das Verhalten der Isolation über längere Zeiträume, auf die es in Wirklichkeit ankommt. Da die Vorgänge, die sich bei der Alterung abspielen, noch weitgehend ungeklärt sind, ist eine Prüfung über längere Zeiträume unerlässlich, wenn ein genaues Bild über die Alterungsbeständigkeit eines Isolierstoffes gewonnen werden soll. Als Anzeige für die fortschreitende

Alterung wurden in den bisher bekanntgewordenen Versuchen meist die mechanischen Eigenschaften gemessen, die etwa nach den Kurven in Abb. 3 abnehmen; es hat sich nämlich ergeben, daß die elektrischen Eigenschaften, wie Durchschlagfestigkeit oder Isolationswiderstand, die vor allem wichtig sind, durch den Einfluß nicht zu langer Wärmebeanspruchung für einige Isolierstoffe nur unwesentlich geändert werden, selbst wenn die Isolation mechanisch fast als vollkommen zerstört anzusehen ist. Dieser Sachverhalt konnte durch eigene Messung bestätigt werden.

Es erhebt sich nun die Frage, welche Abnahme der Zugfestigkeit, der Dehnung oder einer anderen physikalischen Eigenschaft noch als zulässig angesehen werden kann, um ein einwandfreies Arbeiten der Maschine zu gewährleisten; denn erst unter Zugrundelegung von zulässigen Kleinstwerten, z. B. der Festigkeitseigenschaften, kann dann aus den Versuchsergebnissen angegeben werden, welche Temperatur der Isolation auf längere Zeit, etwa entsprechend der heute üblichen Lebensdauer elektrischer Maschinen, zugemutet werden darf, ohne daß vorzeitige Zerstörungen eintreten. Darnach ist der Wert von Ergebnissen aus bisherigen Einzeluntersuchungen an Isolierstoffen, wie sie in größerer Zahl [8] durchgeführt wurden, weitgehend in Frage gestellt, da eine Übertragung auf die wirklich vorliegenden Verhältnisse, z. B. in der Maschine, kaum möglich erscheint. Lediglich durch Vergleich mit Stoffen, deren Verhalten bei höheren Temperaturen auf Grund langjähriger Erfahrung bekannt ist, wie z. B. bei Baumwolle, können gewisse Anhaltspunkte für die zulässigen Temperaturen gewonnen werden.

Wenn es sich darum handelt, den Einfluß erhöhter Temperaturen auf die Eigenschaften der Isolierstoffe festzustellen, müssen diese Versuche über lange Zeiträume ausgedehnt werden, um für den Elektromaschinenbau verwendbare Ergebnisse zu liefern. Ferner sollen möglichst viele Eigenschaften mechanischer und chemischer Natur gemessen werden, um ein genaueres und umfassenderes Bild der Alterung zu gewinnen, da die einzelnen Eigenschaften sich, wie oben ausgeführt, verschieden stark ändern. Es kann deshalb auch nicht von Alterung schlechthin gesprochen werden, sondern es muß angegeben werden, auf welche Eigenschaft sich die Alterung bezieht.

Die Prüfungen selbst sind weitgehend der Art des zu untersuchenden Stoffes und dem Ziel der Untersuchung anzupassen; es ist daher wohl kaum möglich, allgemeine Richtlinien hierfür anzugeben. Anhaltspunkte sind in den entsprechenden Veröffentlichungen zu finden.

Das praktische Ziel dieser Untersuchungen ist zunächst, die für den betreffenden Isolierstoff zulässige „Dauer“temperatur zu ermitteln. Die zulässige Dauer temperatur kann im Elektromaschinenbau als die maximale Temperatur definiert werden, der ein Isolierstoff während der Zeit, die für die Maschine als Lebensdauer vorgesehen ist, gerade noch ausgesetzt werden kann, ohne daß die Wicklung unbrauchbar und zerstört wird. Übertragen auf die Versuchstechnik haftet dieser Definition der Mangel an, daß nicht angegeben werden kann, für welche Werte irgendwelcher physikalischen oder chemischen Eigenschaften diese Zerstörung eintritt.

Weiter sollten diese Untersuchungen den Zusammenhang zwischen zulässiger Temperatur und Lebensdauer einer Maschine liefern, so daß ohne weiteres festgelegt werden kann, mit welcher Lebensdauer zu rechnen ist, wenn eine bestimmte Temperatur bzw. Belastung zugelassen wird. Aus der Lebensdauerkurve einer Maschine lassen sich die lebensverkürzenden Einflüsse von Überlastungen bzw. Kurzschlüssen und unter der Voraussetzung der der Nennlast und der Nenntemperatur zuzuschreibenden „Nennlebensdauer“ die zur Kompensation der Überlastungen notwendigen „schonenden“ Unterbelastungen der Maschine nach Größe und Dauer ermitteln.

Montsinger [9] hat diesen Zusammenhang für Stoffe der Isolationsklasse A, „das Lebensdauergesetz“, allerdings für Transformatoren, angegeben. Er hat durch Vergleich verschiedener Ergebnisse von Alterungsprüfungen gefunden, daß der Zusammenhang zwischen der Zeit, nach der eine bestimmte Abnahme der mechanischen Eigenschaften eintritt, und der hierzu notwendigen Temperatur durch eine  $e$ -Funktion dargestellt werden kann und zwar derart, daß diese Zeit sich verdoppelt für eine Abnahme von 80 C. Dieses Ergebnis erinnert an den aus der Reaktionskinetik bekannten Zusammenhang zwischen Reaktionsgeschwindigkeit und

Temperatur. Aus dieser sogenannten 8<sup>0</sup>-Regel ergibt sich ein Gesetz der Form:

$$t = t_0 \cdot 2^{-\frac{\vartheta}{\Delta \vartheta}} = t_0 e^{-\ln 2 \cdot \frac{\vartheta}{\Delta \vartheta}} = t_0 e^{-\frac{\vartheta}{8} \ln 2} = t_0 \cdot e^{-0,088 \vartheta},$$

wenn:  $t$  die Zeit in Jahren,  
 $\vartheta$  die Temperatur in  $^{\circ}\text{C}$ ,  
 $\Delta \vartheta$  die Temperatur, für die die Zeit verdoppelt wird ( $8^{\circ}\text{C}$ ),  
 $t_0$  die Zeit für  $\vartheta = 0^{\circ}\text{C}$  bedeuten.

Es bleibt in der Gleichung noch die Konstante  $t_0$  zu bestimmen, die die Übertragung der Einzelergebnisse auf die ausgeführten Maschinen vermitteln soll. Zur Festlegung dieses Wertes nahm **Montsinger** an, daß nach seiner praktischen Erfahrung die Isolation nach 7 Jahren zerstört werde, wenn sie dauernd einer Temperatur von  $105^{\circ}\text{C}$  ausgesetzt sei.

Daraus ergibt sich:

$$t_0 = 7 \cdot e^{0,088 \cdot 105} = 7,15 \cdot 10^4 \text{ [Jahre]},$$

so daß das endgültige Lebensdauergesetz lautet:

$$t = 7,15 \cdot 10^4 \cdot e^{-0,088 \vartheta} \text{ Jahre.}$$

Die Schwäche dieses Gesetzes liegt darin, daß nicht nachzuprüfen ist, ob die Annahmen, die zur Bestimmung von  $t_0$  führen, den Tatsachen entsprechen. Andererseits verursachen aber verhältnismäßig geringfügige Änderungen dieser Voraussetzungen große Abweichungen des Endergebnisses; würde man z. B. annehmen, daß die Zerstörung in 7 Jahren nicht bei  $105^{\circ}\text{C}$ , sondern bei  $113^{\circ}\text{C}$  erfolge, würde diese Annahme eine Verdoppelung der Lebensdauer bedeuten. Aus den vorgenannten Gründen kann diesem Gesetz wohl kaum eine exakte Gültigkeit zugesprochen werden, zumal auch die  $e$ -Funktion für die Alterung nach anderen Messungen für bestimmte Temperaturbereiche nur in recht grober Annäherung zutrifft; größenordnungsgemäß wird man immerhin einigen Anhalt durch eine derartige Beziehung gewinnen können.

Trägt man die Lebensdauer — etwa in Stunden — in Abhängigkeit von der vorkommenden Maschinentemperatur auf, wobei der Verbrauch an „Lebensfähigkeit“ in Prozent als Parameter ein-



gezeichnet ist, so läßt sich für verschiedene Belastungszustände der „Gesamtverschleiß“ der Maschine bzw. die noch vorhandene Lebensdauer durch einfache Addition des Verschleißes bei den einzelnen

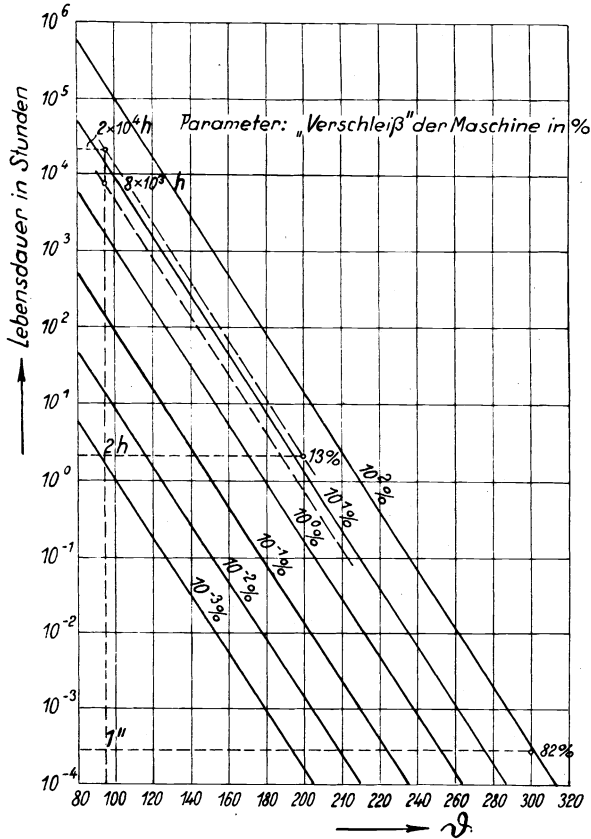


Abb. 4. Lebensdauerbestimmung einer Maschine mit verschiedener Belastung nach dem „Montsinger“-Gesetz.

Temperaturen und Belastungsdauern aus einer solchen Netztafel entnehmen.

In Abb. 4 ist nach dem Montsinger-Gesetz eine derartige Netztafel aufgezeichnet. Wenn z. B. eine Asynchronmaschine der Isolationsklasse A, für die diese Netztafel gelten soll, bei Betrieb

auf zwei Phasen auf  $200^{\circ}\text{C}$  kommt und 2 Stunden bei dieser Temperatur verharret, so würde diese Beanspruchung schon 13 % der Gesamtlebensdauer absorbieren und dem „Verschleiß“ einer  $2,0 \cdot 10^4$  stündigen Nennbelastung entsprechen. Erleidet diese Maschine ferner noch einen Kurzschluß mit  $300^{\circ}\text{C}$  1 Sekunde lang, so kostet diese Beanspruchung der Maschine weiter 82 % ihres Lebens, so daß für Nennlast —  $95^{\circ}\text{C}$  — für den Rest der 5 % Lebensfähigkeit nur noch eine Betriebsdauer von 8000 Stunden übrigbleibt.

Voraussetzung für eine solche Rechnung ist das Vorhandensein einer zutreffenden Lebensdauerkurve für die in Betracht kommende Maschine und die genaue Erfassung der Temperaturen und ihrer Einwirkdauer bei den verschiedenen Belastungen. Es liegt in der Natur der Sache, daß für Maschinen mit etwaigen Fabrikationsfehlern in der Wicklung eine derartige Lebensdauerberechnung keine zutreffenden Werte liefert. Lebensdauerkurven werden sich nur als Mittelwerte aus einer größeren Anzahl von Messungen aufstellen lassen, wobei die Einzelergebnisse bei den verschiedenen Temperaturwerten noch verhältnismäßig große Streuung aufweisen werden.

## IV. Isolierstoffe des Elektromaschinenbaues und ihre Eigenschaften

### A. Allgemeines

Naturstoffe sind selten in dem Zustand, in dem sie gefunden oder gewonnen werden, als Isolierstoffe brauchbar; sie sind vielmehr durchweg einer dem Verwendungszweck entsprechenden Reinigung und Veredlung zu unterziehen. Meist stellt der fertige Isolator, wie er im Elektromaschinenbau Verwendung findet, auch keinen homogenen Stoff dar; er setzt sich vielfach aus verschiedenen Ausgangsstoffen zusammen. So ist z. B. Baumwolle als Leiterisolation wegen ihrer hygroskopischen Eigenschaft allein nicht brauchbar. Eine mit Baumwolle isolierte Spule wird daher noch mit einem Lack getränkt; dieser hat dann eine mehrfache Aufgabe: zunächst Hohlräume auszufüllen, dann die Baumwolle auf den Leiter zu kleben und schließlich die Leiter unter sich selbst zusammenzubacken. Man kann allgemein unterscheiden in Träger der Isolation und eigentlichen Isolator. Bei Mikanitpapier z. B. ist das Papier Träger für die Isolation Glimmer; beide werden durch Lack als Klebstoff und Isolator zugleich zusammengehalten. Wie aus diesen wenigen Beispielen schon hervorgeht, hat der schlechthin mit Isolator bezeichnete Baustoff im Elektromaschinenbau den mannigfaltigsten Aufgaben zu dienen und daher den verschiedensten Anforderungen zu genügen.

Bei der Besprechung der Eigenschaften der Isolierstoffe sollen die einzelnen verwendeten Stoffe in zwei große Gruppen eingeteilt werden. In die erste Gruppe fallen die Isolierstoffe, die seit langem schon in Gebrauch sind und sich mehr oder weniger im Elektromaschinenbau bewährt haben, in der Mehrzahl aber auf ausländischer Rohstoffbasis beruhen. Ihre physikalischen Eigenschaften können

daher, als größtenteils bekannt, unter besonderer Herausstellung der den Elektromaschinenbauer interessierenden Werte kurz behandelt werden. Damit soll weiter eine Vergleichsmöglichkeit für die in der zweiten Gruppe eingehend angeführten Stoffe gegeben werden.

Die allgemeine Entwicklung im Maschinenbau geht dahin, aus den gegebenen Stoffen das Höchstmögliche herauszuholen, also weitgehendst werkstoffgerecht zu konstruieren; parallel dazu wurde die Forschung in der Stoffkunde vorwärtsgetrieben, die Aufklärung brachte oder noch bringen wird über die Struktur der Stoffe und deren Zusammenhang mit den physikalischen Eigenschaften. Weiter wurde versucht, Naturstoffe, an die Sonderforderungen zu stellen waren, durch strukturelle oder chemische Eingriffe zu veredeln, oder auch durch Kunststoffe zu ersetzen, um bessere, den Spezialzwecken angepaßte Eigenschaften zu erreichen. Diese Bestrebungen wurden in Deutschland durch den zweiten Vierjahresplan besonders gefördert.

In die zweite Gruppe der Isoliermaterialien sollen nun die Stoffe eingereiht werden, die im Verfolg des Zieles des Vierjahresplanes auf Verwendung heimischer Baustoffe entwickelt und gefördert wurden. Der Zweck der folgenden Untersuchungen besteht darin, festzustellen, ob und wie weit es möglich ist, diese „neuen“ Stoffe auch für den Elektromaschinenbau mehr als bisher nutzbar zu machen. Die Entscheidung über die Einführung einzelner Isolierstoffe kann zunächst nur erleichtert werden an Hand kurzzeitiger Prüfung und Vergleich mit entsprechenden Versuchsergebnissen bekannter und bewährter Isolationen. Das endgültige Urteil über die völlige Brauchbarkeit und die Empfehlung auf allgemein gültige Einführung eines „neuen“ Isolierstoffes muß der Praxis auf Grund positiver Erfahrung von hinreichender Dauer vorbehalten bleiben.

In der folgenden Zusammenstellung werden zunächst die für die verschiedenste Formgebung geeigneteren und daher schon seit den Anfängen des Elektromaschinenbaues fast ausschließlich verwendeten organischen Stoffe angeführt, beginnend mit Lacken; dann folgen Faserstoffe. Zu guter Letzt werden die anorganischen Isolierstoffe, Asbest und Glimmer, behandelt.

## B. Alte Isolierstoffe

### a) Lackrohstoffe

Nach Scheiber [10] versteht man unter Lacken allgemein eine Auflösung nicht flüchtiger Stoffe in flüchtigen, organischen Lösungsmitteln. Der Zweck der Lacke in der Elektrotechnik ist verschieden; er dient dazu, entweder einen Film hervorzubringen, zu kleben oder auch Hohlräume auszufüllen. Es sind also bei den Lacken zu unterscheiden zwischen den Rohstoffen, die den Film bilden, die sogenannten Filmbildner, und den Lösungs- oder Verdünnungsmitteln, die den Filmbildner lösen. Es gibt feste und flüssige Filmbildner und Gemische aus beiden.

Danach läßt sich folgende Einteilung vornehmen:

1. Filmbildner: a) Naturharze:
    - $\alpha$ ) Terpentine und Kolophonium,
    - $\beta$ ) Kopale,
    - $\gamma$ ) Stocklack (Schellack).
  - b) Trocknende Öle:
    - $\alpha$ ) Leinöl,
    - $\beta$ ) Holzöl.
  - c) Bituminöse Stoffe (Asphalte, Teere, Pech).
  - d) Celluloseverbindungen.
2. Lösungsmittel.
  3. Zusatzstoffe.

1. Naturharze. Unter dem Sammelbegriff Harze versteht man eine Reihe von Stoffen, die hauptsächlich auf Grund ihrer gemeinsamen physikalischen Eigenschaften, wie Strukturaufbau, Löslichkeit, Isolationsvermögen, als Einheit zusammengefaßt werden können. Die Naturharze sind mit Ausnahme des Stocklacks pflanzliche Produkte. Bei den Kunstharzen dagegen, die in einem späteren Abschnitt besprochen werden sollen, handelt es sich um synthetisch hergestellte Harze.

α) Terpentine sind Abscheidungen gewisser lebender Fichtenarten; sie werden zum größten Teil in Amerika, ferner in Frankreich und Spanien gewonnen. Terpentine selbst finden zur Lackherstellung selten Verwendung, dagegen sind sie Ausgangsstoffe für Terpentinöl und Kolophonium. Auch Kolophonium im Rohzustand ist für Isolierlacke nicht geeignet, da es z. B. niedrigen Erweichungspunkt (70° C) hat. Durch Reinigungs- und Veredlungsprozesse kann es dagegen, wie fast alle Naturharze, in gewissen Grenzen in seinem Molekülaufbau geändert und so verschiedenen Verwendungszwecken besser angepaßt werden. Als veredelte Produkte allein oder auch mit Kunstharzen gemischt, benutzt man Terpentine zur Lackverarbeitung.

β) Kopale. Unter Kopalen versteht man eine Vielzahl von rezenten und halb fossilen Harzen, die sich in ihren chemischen und physikalischen Eigenschaften wesentlich unterscheiden. Fundort sind Afrika und Südamerika. Kopale werden zur Lackherstellung wie Kolophonium einer Vorbehandlung unterworfen.

γ) Schellack. Schellack selbst ist ein gereinigtes Produkt des Stocklackes, den man in Indien aus Abscheidungen der Lacklaus gewinnt; er wird mit Spiritus zu Lacken und Imprägnierlösungen benutzt. Auf Grund seiner Eigenschaft, beim elektrischen Durchschlag keine leitenden Rückstände zu bilden, ferner seiner großen Härte und Elastizität sowie hoher Spannungsfestigkeit wurde er sehr viel als Isoliermaterial in der Elektrotechnik verwendet.

2. Trocknende Öle. Von der Vielzahl der Öle sind als Filmbildner nur die Öle brauchbar, die mit der Zeit einen festen Film bilden, der zugleich klebende Eigenschaften aufweist. Man nennt diese Öle „trocknende“ im Gegensatz zu halbtrocknenden oder nicht-trocknenden. Der Luftsauerstoff scheint bei der Trocknung eine maßgebende Rolle zu spielen, worauf bei der Verarbeitung, die also nicht unter Luftabschluß geschehen darf, zu achten ist. Die hauptsächlich für Öllack in Frage kommenden Öle sind Leinöl und Holzöl.

α) Leinöl. Leinöl wird aus dem Samen von Flachs, dem sogenannten Leinsamen, hauptsächlich in Argentinien, Indien, Rußland,

USA. und Rumänien gewonnen. Lackleinöl zur Herstellung von Lack muß noch besonderen Reinigungsprozessen (Raffinaden) unterworfen werden.

β) Holzöl. Holzöl wird aus den Früchten des in China und Japan vorkommenden Tungbaumes gewonnen und zur Lackherstellung veredelt.

3. Bitumen. Man unterscheidet zwischen natürlichen und künstlichen Bitumen (Asphalten). Die natürlichen Asphalte, die meist an der Erdoberfläche in sogenannten Pechseen vorkommen, sind durch mineralische Bestandteile stark verunreinigt, so daß sie in der Lackherstellung selten Verwendung finden. Als Fundstätten sind zu nennen: Trinidad, Süd- und Mittelamerika und Kalifornien. Ihr Schmelzpunkt liegt bei 50° C.

Wichtig sind die Asphaltite oder Glanzpeche; sie werden hauptsächlich in Syrien, am Toten Meer und in Amerika (Gilsonit) gewonnen. Ihr Schmelzpunkt liegt bei 120° C.

Die Kunstasphalte oder Peche sind Nebenprodukte der Destillationsprozesse von Steinkohle, Braunkohle, Holz- oder Erdölen und werden dann Steinkohlenteerpeche, Erdölpech usw. genannt.

4. Celluloseester. Celluloseester wie Nitro- und Acetylcellulose, die aus Baumwoll- oder Holzcellulose gewonnen werden, sind Ausgangsstoffe für die sogenannten Celluloselacke.

5. Lösungsmittel. Die Lösungsmittel haben den Zweck, die Filmbildner zu lösen oder zu dispergieren und den Lacken als Verdünnungsmittel die Viskosität zu erteilen, die zu ihrem Auftragen nötig ist. Nach dem Auftrag sollen sie möglichst rückstandslos wieder verdunsten.

Als Lösungsmittel für fette oder Öllacke werden verwendet: Terpentinöl, Benzin, Benzolkohlenwasserstoffe, synthetische Kohlenwasserstoffe und chlorierte Kohlenwasserstoffe.

Für „flüchtige“ Lacke werden Alkohole, Ester, Ketone, Äther und Schwefelkohlenstoff verwendet.

Die Auswahl dieser Stoffe richtet sich nach dem Filmbildner, der ja in dem Lösungsmittel gelöst werden soll und nach der Qualität sowie den Anforderungen, die an den Lack gestellt werden.

6. Zusatzstoffe. Für ölhaltige Lacke werden Zusatzstoffe, sogenannte Sikkative, verwendet, die nach Art eines Katalysators die Trocknung des Filmes beschleunigen. Es werden dazu gewisse Salze der Metalle Kobalt, Mangan und Blei benutzt. Derart aktivierte Öle nennt man „Firnisse“. Bei Isolierlacken ist aber bei der Anwendung solcher Stoffe Vorsicht geboten, da sie sich schädlich auf die elektrischen Eigenschaften des Lackes auswirken und seine Tiefentrocknung verhindern können.

Als weitere Zusatzmittel verwendet man besonders bei Celluloselacken sogenannte Weichmacher, die die Elastizität des Lackfilms erhöhen sollen.

### b) Lacke

1. Allgemein. Lacke werden in der Praxis nach ihrem Verwendungszweck und nach ihrer Zusammensetzung bezeichnet. Nach dem Verwendungszweck unterteilt, kann man folgende Gruppen nennen:

- |                              |                   |
|------------------------------|-------------------|
| 1. Isolierlacke,             | 3. Überzugslacke, |
| 2. Tränk-(Imprägnier-)lacke, | 4. Kleblacke.     |

Diese Einteilung hat den Nachteil, daß über die Güte eines Lackes nichts ausgesagt wird. Bei der Einteilung des Lackes nach seiner Zusammensetzung benennt man den Lack nach den Filmbildnern. Man kommt dann zu folgender Einteilung, nach der auch nachstehend die einzelnen Lacke besprochen werden sollen:

1. Lacke mit nur festen Filmbildnern:
  - a) Harzlacke,
  - b) Asphaltlacke,
  - c) Celluloseesterlacke.
2. Lacke mit flüssigen Filmbildnern.
3. Lacke mit festen und flüssigen Filmbildnern (Öllacke).

Auch aus diesen Angaben kann noch nichts über die Brauchbarkeit des Lackes für den besonderen Zweck geschlossen werden, da



es, wie oben schon erwähnt, sehr auf den Zustand der verarbeiteten Rohstoffe und die Verarbeitung selbst ankommt.

Oft haben die Lacke auch Phantasienamen, so daß der Nichtfachmann, zu denen in diesem Falle der Elektromaschinenbauer zu zählen ist, sich weitgehend auf die Angaben der Lackhersteller verlassen muß. Da die Lackchemie immer noch in der Entwicklung ist, Änderungen und Verbesserungen ständig zu erwarten sind, wäre es zwecklos, genaue physikalische Werte anzugeben. Man müßte all die vielen Lacke, die augenblicklich auf dem Markt sind, einer genauen Untersuchung unterziehen und wäre dabei doch nicht sicher, daß diese schon morgen wieder überholt sind. Man bleibt also darauf angewiesen, vor Neueinführung eines Lackes diesen einer Eignungsprüfung zu unterziehen. Mit den oben besprochenen Einschränkungen sind für Lackdrähte, die in DIN VDE 6450 vorgesehenen Prüfungen brauchbar. Sie geben allerdings nur Mindestwerte, die bei der Aufstellung dieser Normen erreichbar waren.

Man unterscheidet speziell die Isolierlacke oft nach der Trocknungsart und ihrer Farbe und nennt sie lufttrocknende und ofentrocknende Lacke, schwarze und durchscheinende; bei der Trocknung muß getrennt werden in Lacke, bei denen der Trockenvorgang nur ein Verdunsten des Lösungsmittels darstellt, wobei zur Beschleunigung dieses Vorgangs die Trocknung auch bei mäßigen Temperaturen im Trockenofen vorgenommen werden kann. Bei der anderen Gruppe ist mit dem Trocknen eine chemische Umwandlung verbunden. Diese Lacke müssen meist im Ofen bei ganz bestimmter Temperatur während bestimmten Zeiten „eingebrannt“ werden.

Daraus ist zu ersehen, daß die Art der Trocknung Einfluß auf die Eigenschaften der Lacke hat. Um Mißerfolge zu vermeiden, muß der Verbraucher sich genau an die Verarbeitungsvorschriften halten, die meist den Lacken beigegeben oder von der Herstellerfirma zu erfragen sind; diese können je nach der Art des Lackes verschieden sein.

Zur allgemeinen Beurteilung der Lacke kann manchmal die von Findley, Harvey und Rodgers angegebene Aufstellung nützlich sein, die die Lackeigenschaften enthält, die sich bedingen oder die sich ausschließen [2].

Eigenschaften, die sich direkt bedingen		Eigenschaften, die sich ausschließen	
Wärmebeständigkeit	} Trockenzeit	} Härte Ölbeständigkeit Klebefähigkeit Hohe Trocknungstemperatur	} Plastizität
Flexibilität			
Widerstandsfähigkeit gegen Öl	} Härte		
Gleichmäßigkeit des Auftrages		} Viskosität Flüchtigkeit des Lösungsmittels	} Flexibilität Wärmebeständigkeit
Dicke des Auftrages	} Viskosität Flüchtigkeit des Lösungsmittels Gehalt an Lackkörper		
Imprägnierfähigkeit		} Viskosität Flüchtigkeit des Lösungsmittels	
Verdampfungsverlust			

α) *Harzlacke*. Harzlacke sind Lösungen von Harzen als Filmbildner in geeigneten, flüchtigen Lösungsmitteln. Die Eigenschaften des Films hängen allein von den benutzten Harzen ab und die Auswahl der Lösungsmittel von der Löslichkeit der Harze. Man unterscheidet zwischen Spirituslacken, wenn Spiritus oder dessen Äquivalente als Lösungsmittel benutzt werden und sogenannten flüchtigen Lacken, wenn Kohlenwasserstoffe als Lösungsmittel dienen.

Allen diesen Lacken ist eine gewisse Sprödigkeit eigen, die durch Zusatz geeigneter Mittel, z. B. bestimmter Öle, mehr oder weniger beseitigt werden kann. Die in der Elektrotechnik verwendeten Spirituslacke enthalten als Filmbildner meist Schellack gelöst, der durch Erhitzen in einen unlöslichen Zustand überführt werden kann. Neben guten elektrischen Eigenschaften weist der Schellack gute mechanische Eigenschaften auf. Spirituslack auf Grundlage von Weichmanilakopal hat nicht diese guten Eigenschaften und kann daher nur als Ersatz für den Schellack angesehen werden. Als Isoliermittel dient der Schellack-Spirituslack zur Vorimprägnierung von Wicklungen, als Schutzanstrich und zum Kleben von Mikanit. Gegenüber den fetten Lacken weist der Spirituslack nicht die hohe

Alterungsbeständigkeit auf, hat aber den Vorzug, daß er schneller trocknet.

β) *Asphaltlacke*. Asphaltlacke sind Lösungen von Natur- oder Kunstasphalten oder beide gemischt in Kohlenwasserstoffen. Besonders brauchbar sind Gilsonit und syrischer Asphalt. Diese Lacke ergeben einen gut trocknenden Film, der aber hohe Sprödigkeit besitzt. Um einen elastischeren Film zu erhalten, werden die Naturasphalte mit Petroleum oder Stearinpech gemischt.

γ) *Celluloseesterlacke*. Die aus Acetylcellulose hergestellten bekannten „Cellonlacke“ sind Lösungen des festen Cellons, die beim Verdunsten filmartige Schichten zurücklassen; sie sind verwendbar als Tränk- und Schutzlacke; mit steigender Härte der Cellonschicht wächst die Durchschlagsspannung, die im Maximum etwa 60 kV/mm erreicht; Cellonlacke zeigen hohe mechanische Festigkeiten und verhalten sich abweisend gegen Wasser, Fette, Öle und Säuren, Alkalien sowie chemische Gase. Ferner sind sie lufttrocknend. Die Gründe, aus denen sich diese an und für sich brauchbaren Lacke wenig eingeführt haben, liegen in der Umständlichkeit der Verarbeitung; Cellonschichten vertragen sich nicht mit Öl, Harzen, Asphalten u. dgl., daher können sie nicht auf die gebräuchlichen Isolierstoffe aufgetragen werden. Harz- und Cellonschichten weichen sich sogar gegenseitig auf. Dazu kommt, daß die Cellonlacke sehr feuergefährlich sind und bei der Verarbeitung Vorsichtsmaßregeln gegen Gesundheitsschäden der Arbeiter erfordern.

2. Lacke mit flüssigen Filmbildnern. Leinöl hat die Eigenschaft, klebfreie und elastische Filme zu bilden. Es kann daher, unter Beimengungen von Zusätzen, die das Trocknen beschleunigen, ohne weitere Zusätze als „Lack“ Verwendung finden. Eine besondere Beständigkeit weisen die sogenannten Standöle auf. Standöle sind Öle, die längere Zeit bei hohen Temperaturen (250 bis 270°) erhitzt werden. Dabei bilden sich im Öl harzartige Stoffe. Die Standöle müssen zur Verarbeitung im Gegensatz zu den Firnissen verdünnt werden. Weiter erhalten sie Zusätze von Sikkativen und werden mit Berliner Blau vermengt. Dadurch gewinnen sie eine dunkle Färbung.

Bis vor kurzem war nur mit diesen Leinölstandöl-„Lacken“ eine Elastizität der Filme zu erreichen, wie sie für die Drahtisolation gefordert wird.

3. Lacke mit festen und flüssigen Filmbildnern (Öllacke). Als nichtflüssige Filmbildner werden Harze mit Ausnahme von Schellack und bituminöse Stoffe verwendet, zu Isolierlacken meist Kolophonium, Kopale und besonders präparierte Asphalte. Als flüssige Filmbildner kommen trocknende Öle in Betracht. Das Mischungsverhältnis ist verschieden, und man bezeichnet Lacke mit hohem Ölgehalt als „fette“ Lacke. Wenn der Harzgehalt gegenüber Öl überwiegt, spricht man von „mageren“ Lacken. Die ganze Gruppe wird allgemein als Öllacke bezeichnet. Die dem Verwendungszweck angepaßte Viskosität wird durch Verdünnungsmittel erreicht. Hierfür werden bei guten Lacken Terpentinöle, Holzterpentinöle und Lackbenzine verwendet.

Die Elastizität des Films steigt mit wachsendem Ölgehalt, ebenso die Trockenzeit und die Trockentemperatur. So erhält man z. B. bei einem Mischungsverhältnis von Öl zu Harz wie 1 : 1 einen gewöhnlichen lufttrocknenden Isolierlack, während bei einem Verhältnis 2 : 1 ein hochwertiger, ofentrocknender Isolierlack entsteht.

4. Compoude. Als Füllmassen werden im Elektromaschinenbau sogenannte Compoude verwendet. Es sind meist Asphalte (Gilsonit) oder Teere (Steinkohlenteerpech) mit Vaselinen und geringen Harzzusätzen (Verschmelzen). Sie haben den Nachteil eines niedrigen Erweichungspunktes.

Man benutzt zum Tränken, Festhalten und Ausfüllen von Hohlräumen der Wicklungen Tränklacke, also Lacke der oben angeführten Arten, die noch zusätzlich hohes Eindringungs- und Backvermögen haben. Man kann je nach Güte der Füllmassen höhere zulässige Temperaturen erreichen, läuft aber Gefahr, besonders bei Verwendung von Emaillelackdrähten, daß sich die Isolierschicht des Drahtes in den Tränkmitteln löst. Man muß dann Isolierlack des Drahtes und Tränklack so aufeinander abstimmen, daß der eine nicht den anderen löst.

Weiter besteht die Gefahr, daß durch Verdunsten des Lösungsmittels beim Trocknen ein Schwinden des Lackes stattfindet und so nicht alle Hohlräume ausgefüllt werden.

### c) Naturfaserstoffe

1. Allgemeines. Die Faserstoffe stellen eines der wichtigsten Produkte der Weltwirtschaft dar. In allen Erdteilen werden sie in mannigfaltigen Sorten erzeugt, verarbeitet und verbraucht. Daher rührt auch die große Buntscheckigkeit in Begriffen und Bezeichnungen der Maßsysteme, die auf dem Gebiete der Textiltechnik anzutreffen und heute noch üblich sind. Um zwischen bekannten und neuen Textilerzeugnissen, insbesondere ausländischer Herkunft, besser vergleichen zu können, dürfte es zweckmäßig sein, zunächst einiges zur Terminologie der Textiltechnologie, soweit dies hier notwendig erscheint, zusammenzustellen [11].

Die Nummer eines Garnes, auch Feinheitsnummer genannt, ist gegeben durch das Verhältnis: Länge/Gewicht des Fadens. Werden die Größen: Länge und Gewicht in verschiedenen Maßsystemen, etwa dem metrischen oder dem englischen ausgedrückt, so erhält man die sogenannte metrische oder englische Garnnummer. Für Seiden- und Kunstseidengarne ist heute allgemein der legale Titer [ausgedrückt in der Gewichtseinheit des Denier(den)] das Maß der Feinheit, wobei zwischen Gesamttiter (für das Garn) und Einzeltiter (für die Faser) unterschieden wird.

Im einzelnen: die metrische Nummer  $N_m$  gibt an, wieviel Strähne von je 1000 m auf 1 kg, oder wieviel m auf 1 g gehen.

Die englische Nummer  $N_e$  oder Baumwollnummer gibt an, wieviel Strähne von 840 Yards (768 m) auf 1 engl. Pfund (453,59 g) gehen.

Die Leinennummer gibt an, wieviel Gebinde von 300 Yards (274,3 m) auf 1 engl. Pfund (453,59 g) gehen.

Die Seiden- und Kunstseidennummer gibt an, wieviel Deniers (1 den = 0,05 g) 450 m oder — umgerechnet auf volle Gramm — wieviel Gramm 9000 m eines Fadens wiegen, ist also dem Verhältnis Gewicht/Länge proportional.

*Garnumrechnung:*  $1 (N_m) = 1,69 \cdot 1 (N_e)$ ; die Nummer  $N_m$  100 entspricht also der Nummer 59 (engl.); die Nummer  $N_e$  100 entspricht also der Nummer 169 (metr.).

*Der legale Titer:* den =  $9000/N_m$ .

Als Beispiel für die Unterscheidung: Gesamt- und Einzeltiter sei ein Garn mit 120 Gesamttiter angeführt. Dieses Garn kann bestehen aus:

24 Einzelfasern (normalfädig) der Einzeltiter 120 : 24 = 5 den  
 48 Einzelfasern (feinfädig) der Einzeltiter 120 : 48 = 2,5 den  
 100 Einzelfasern (feinstfädig) der Einzeltiter 120 : 100 = 1,2 den

### Festigkeit und Durchmesser

Zum Vergleich der Festigkeit der Faserstoffe verschiedener Feinheit wird die Reißlänge  $R$  (in km) angegeben. Ist  $P$  die Bruchlast in g, so gilt:

$$R = \frac{P \cdot N_m}{1000} \text{ [km]}.$$

Die spezifische Zugfestigkeit  $p$  ergibt sich zu:

$$p = R \cdot s \text{ [kg/mm}^2\text{]}; \quad s = \text{spez. Gew.}$$

Bei Seide gibt man oft die Festigkeit  $F$ , bezogen auf die Querschnittseinheit, in den an:

$$F = \frac{R}{q} \text{ [g/den]}.$$

Der Durchmesser  $d$  des reinen Materialquerschnitts kann berechnet werden aus:

$$d = \sqrt{\frac{4}{\pi \cdot N_m \cdot s}} \text{ mm,}$$

wenn  $N_m$  in m/g und  $s$  in g/cm<sup>3</sup> eingesetzt wird.

Die relative Naßfestigkeit ist das Verhältnis der mittleren Bruchlast im nassen zu der im trockenen Zustand der Fasern. Sie wird in % der Trockenfestigkeit angegeben.

## Gewichts- und Isolationszunahme [12]

In diesem Zusammenhang sei noch kurz die Gewichts- und Isolationszunahme für Dynamodrähte behandelt. Das Isolationsgewicht in g eines isolierten Drahtes ergibt sich zu:

$$\begin{aligned} G_J &= \left( \frac{\pi D^2}{4} - \frac{\pi d^2}{4} \right) \sigma \cdot l \text{ (g)} \\ &= \frac{\pi}{4} \sigma \cdot l \cdot (D^2 - d^2); \end{aligned}$$

$\sigma$  spez. Raumdichte.

Baumwolle..  $\sigma = 1,1$ ,

Seide.....  $\sigma = 1,53$ .

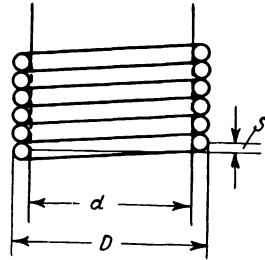


Abb. 5.

Die Länge  $L$  des benutzten Fadens pro m Drahtlänge läßt sich bestimmen aus (Abb. 5):

$$L = \sqrt{\frac{\left(\frac{D+d}{2}\pi\right)^2 + s^2}{s}}$$

2. Baumwolle, Seide, Leinen, Jute. Die Faserstoffe zeigen allgemein folgenden Aufbau: Die Einzelfasern setzen sich aus Zellen, sogenannten Elementarfasern zusammen. Diese selbst bestehen wieder aus feinen Fäserchen, den Fibrillen, die ihrerseits eine Kristallstruktur aufweisen.

Baumwolle muß, wie bekannt, vom Ausland eingeführt werden. Da sie stark hygroskopisch ist, hängen im rohen, unbehandelten Zustand ihre physikalischen, insbesondere ihre elektrischen Eigenschaften weitgehend von der Luftfeuchtigkeit ab. Es ist daher auch nahezu unmöglich, Baumwolle oder die anderen Faserstoffe unbehandelt zu Isolationszwecken zu benutzen. Erst wenn sie imprägniert werden, oder einen Schutzüberzug erhalten, können sie brauchbare Isoliermittel abgeben. Im deutschen Elektromaschinenbau wurden bis vor kurzem Drähte vielfach mit Baumwollgarnen isoliert. Weiter fand Baumwolle Verwendung in Bandform zur Isolierung von Stableitern und zur Umbandelung von Wickelköpfen. Die guten Eigenschaften der Baumwolle sind allgemein

bekannt, so daß sie lange Zeit als Norm betrachtet wurde; nur der Isolationsauftrag war etwas größer als der von Seide; auch die Temperaturbeständigkeit ließ zu wünschen übrig.

Seide, die ähnliche Eigenschaften wie Baumwolle aufweist, wird dann statt Baumwolle zur Isolierung verwendet, wenn ein beschränkter Wickelraum zur Verfügung steht, der Füllfaktor also höher sein muß; sie zeigt bei geringerer Garndicke gleiche mechanische Festigkeit wie Baumwolle, dagegen ist Seide teurer als Baumwolle.

Leinen ist ebenfalls teurer als Baumwolle, hat als Gewebe auch größere Dicken, dafür weist es aber auch höhere mechanische Festigkeit auf.

Jute, ein ausländisches Produkt, wird im Elektromaschinenbau fast nicht verwendet.

Die Eigenschaften der oben angeführten Faserstoffe sind im wesentlichen bekannt, so daß darauf hier nicht weiter einzugehen ist. Erwähnt sei nur noch die Abhängigkeit des Isolationswiderstandes  $R$  von der Luftfeuchtigkeit  $\varepsilon$  in %, die von Stäger [2] für reine Baumwolle angegeben wird zu:

$$R = R_0 e^{-19,5 \cdot 10^{-3} \varepsilon}.$$

$R_0 \dots 2,8 \cdot 10^3 \text{ M}\Omega$  für verdrehte, baumwollisolierte Drähte,

$R_0 \dots 6,2 \cdot 10^4 \text{ M}\Omega$  für Baumwollfäden,

$R_0 \dots 3,2 \cdot 10^5 \text{ M}\Omega$  für Baumwollfasern.

Weitere Eigenschaften der Baumwolle und Seide werden beim Vergleich mit anderen Isolierstoffen weiter unten behandelt.

3. Fertige Isoliermaterialien aus Faserstoffen. Baumwollisolierte Drähte können, wie vorhin erwähnt, ungetränkt kaum zur Herstellung von Wicklungen elektrischer Maschinen verwendet werden. Entweder wird jede fertig gewickelte Spule in Lack getränkt, getrocknet und dann in die Maschine eingebaut, oder man taucht das Blechpaket mit Wicklung im Ganzen in ein Lackbad. Die physikalischen Eigenschaften der so behandelten Spulen hängen in weitem Maße von der Art und Güte des benutzten Lackes ab, so daß allgemein gültige Angaben nicht zu machen sind. Die Anforderungen, die an solche Wicklungen gestellt werden, sind in den VDE-Bestimmungen



festgelegt. Darüber hinaus wäre eine höhere Wärmebeständigkeit erwünscht; diese hängt in geringem Maße auch von dem verwendeten Lack ab; daher sind zuweilen solche Wicklungen höher wärmebeständig als Faserstoffe für sich allein.

Außerdem werden die Faserstoffe in Form von Bändern zur Isolation und Befestigung von Wickelköpfen benutzt, wobei das Band mit der Wicklung gleichzeitig getränkt oder schon getränktes Band Verwendung findet.

Nachstehend seien einige Eigenschaften von Faserstoffbändern in Schaubildern dargestellt, die dem Schrifttum entnommen sind und

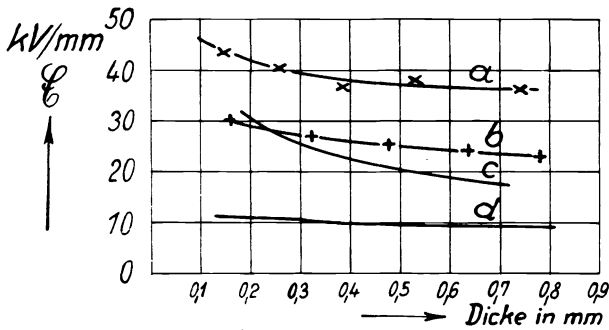


Abb. 6. Durchschlagfestigkeit in kV für lackierte Faserstoffbänder verschiedener Dicke.

zum Teil auf älteren Messungen beruhen. Weitere und auch eigene Messungen seien später als Vergleichswerte bei den „neuen“ Isolierstoffen angegeben.

Abb. 6 zeigt die Durchschlagfeldstärke  $\mathcal{E}$  in kV/mm für Kurve: a) Exzelsiorseide Nr. 2; b) Exzelsiorleinen Nr. 0; c) lackierter Batist; d) geöltes Leinen. Als Elektroden sind Kreisplatten bei diesen Messungen verwendet worden. Die höheren Werte der Kurven a und b sind auf den „Exzelsiorlack“ zurückzuführen [13].

Abb. 7 gibt für Ölleinen die Abhängigkeit der Durchschlagspannung in kV, gemessen zwischen ebenen Plattenelektroden, von der Materialstärke in mm und der Temperatur in  $^{\circ}\text{C}$  an. Dabei war die Temperatureinwirkung nur kurzzeitig, so daß Alterungserscheinungen bei der Messung keine Rolle spielen [8].

In den Abb. 8, 9, 10 ist die Wärme- oder Alterungsbeständigkeit von Baumwollfäden und -bändern dargestellt. Im Auftrage vom VDE hat Schüler [14] die Alterung von Baumwollfäden, gemessen als Abnahme der Zugfestigkeit bei bestimmter Einwirkdauer vorgegebener Temperaturen — Abb. 8 — bestimmt. Die folgenden

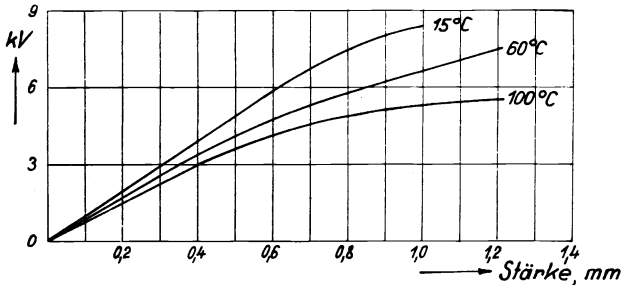


Abb. 7. Durchschlagsspannung in kV von Ölleinen wachsender Stärke bei verschiedener Temperatur.

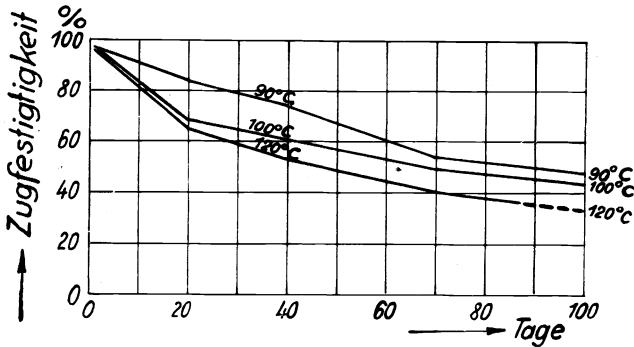


Abb. 8. Zugfestigkeit von Baumwollfäden bei Alterung.

Messungen stammen von Stäger und sind neueren Datums. Die Kurven wurden zwecks vereinfachter Ablesung auf halblogarithmischen Maßstab umgezeichnet, wobei in Anlehnung an die Darstellung der Lebensdauerkurven — vgl. Abb. 4 — die Werte der physikalischen Eigenschaften Zugfestigkeit — Abb. 9 — und Dehnung — Abb. 10 — als Parameter, die Temperatur als unabhängige Veränderliche in linearem und die Zeit in Stunden in logarithmischem

Maßstab aufgetragen sind. Durch die Tränkung – Baumwollband als Träger imprägniert mit einem schwarzen, ofentrocknenden

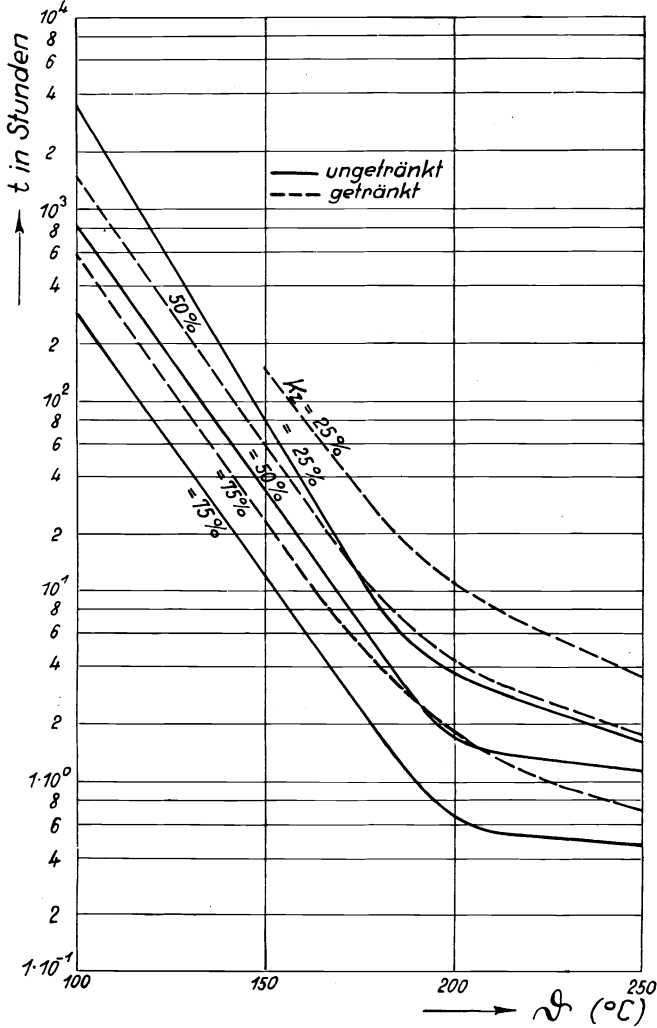


Abb. 9. Wärmebeständigkeit von ungetränktem und getränktem Baumwollband, gemessen für verschiedene Abnahme der Zugfestigkeit  $K_z$ .

Isolierlack auf Leinen-, Holzöl-, Gilsonitbasis – wird die Lebensdauer, gemessen in Zugfestigkeit, auf das Doppelte heraufgesetzt,

dagegen die Lebensdauer, gemessen in Dehnung, durch die Aushärtung des Lackes erheblich verringert. Da der Dehnung der Band-

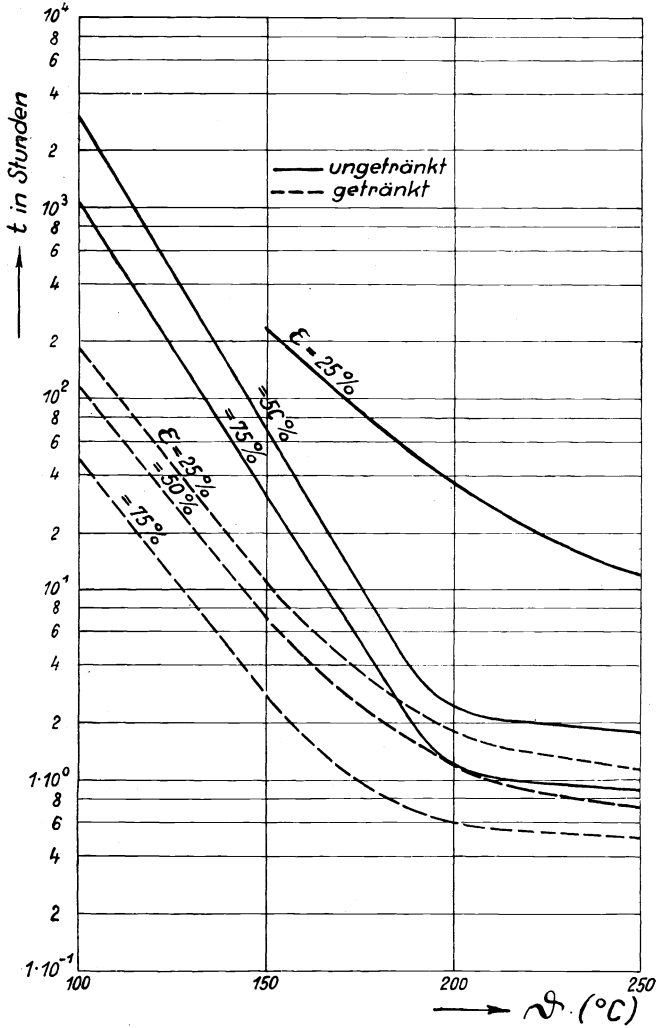


Abb. 10. Wärmebeständigkeit von ungetränktem und getränktem Baumwollband, gemessen für verschiedene Abnahme der Dehnung.

isolation bei der fertigverlegten Wicklung — z. B. Befestigung von Wickelköpfen — nicht die Bedeutung der Zugfestigkeit beizumessen

ist, kann man von einer Verbesserung der Alterungsbeständigkeit durch die Tränkung sprechen. Welche Grenzwerte der physikalischen Größen für die Lebensdauer elektrischer Maschinen maßgebend sind, kann nur, wie früher ausgeführt, der Versuch an der fertigen Maschine selbst bringen. Schon jetzt lassen derartig eigene Untersuchungen erkennen, daß sogar wenige Prozente der Ursprungsgrößen noch einen Betrieb der Maschine ermöglichen. Es ist daher zweckmäßig, Alterungsversuche erheblich weiter als bisher auszudehnen, um auch die Gebiete großer Änderungen der der Alterung zugänglichen Eigenschaften der Isolierstoffe zu erfassen.

#### d) Papier

Im Elektromaschinenbau wird Papier als solches verwendet zur Blech- und Leiterisolation, dann in einer weiteren Verarbeitung zur Herstellung von Hartpapieren und verschiedenen Glimmerfabrikaten und schließlich in Form von Preßspan und dessen Abarten zur Nutisolation.

Die physikalischen Eigenschaften hängen weitgehend ab von den verwendeten Rohstoffen und ihrer Verarbeitungsart.

Rohstoff für das Papier ist neben anderen vor allem die Cellulose. Diese muß, um eine gewisse Festigkeit des Papiers zu erhalten, gemahlen werden. Man unterscheidet drei verschiedene Arten der Mahlung: 1. Spalten der Cellulose in Längsrichtung in Fibrillen, 2. „rösche“ Mahlung in Faserquerrichtung und 3. Überführung in eine breiige Masse, die sogenannte schmierige Mahlung. Bei der ersten Art erhält man Papier mit großer Saugfähigkeit und geringer Dichte, aber großer Zugfestigkeit in Längsrichtung; bei der zweiten, Papier größerer Dichte und geringerer Saugfestigkeit sowie kleinerer mechanischer Festigkeit. Die dritte Art der Mahlung ergibt eine strukturlose, schleimige Masse. Papiere mit guten elektrischen und mechanischen Eigenschaften lassen sich unter Verwendung von Baumwolle, Flachs und Leinen als Rohstoffe herstellen; insbesondere erreichen diese sogenannten Hadern- (Lumpen-) papiere hohe Temperaturbeständigkeit. Wegen ihres hohen Preises werden sie allerdings als Isolierpapier weniger verwendet. Gleichfalls gute Isolier-

papiere erhält man aus den Hölzern langsam wachsender Nadelbäumen, wobei noch der Vorteil der heimischen Rohstoffgrundlage besteht. Je nach der Behandlung unterscheidet man Natron- oder Sulfitzellstoffpapier; durch Glättung (Kalandrierung) der fertigen Papiere ergibt sich eine Erhöhung der mechanischen Festigkeit.

Die Isolierpapiere sollen frei von Alkali- und Säureresten sein, da besonders diese die Alterungsbeständigkeit stark herabsetzen. Das Gewicht der Papiere wird in  $\text{g/m}^2$  angegeben. Dieses ist ungefähr gleich 1000mal der Dicke in mm. Die mechanische Festigkeit wird durch die Reißlänge in Längs- und Querrichtung in km angegeben. Der Aschengehalt, der ein Maß für die Reinheit des Papiers ist, soll möglichst klein, etwa 0,8 bis 1,0% sein.

Nach dem Verwendungszweck unterscheidet man die in folgender Zusammenstellung aufgeführten Papierarten und -dicken [2]:

Verwendungszweck	Stoffzusammensetzung	Dicke in mm
Hartpapierfabrikation	Sulfit- oder Natroncellulose	0,05—0,2
Mikanitfabrikation	Zellstoffpapier, Hadern	0,05—0,15
Blechbeklebung	Sulfitzellstoffpapiere	0,03—0,04
Drahtisolation	Sulfitzellstoffpapiere	0,04—0,075

Papier ist, wie alle Celluloseerzeugnisse, stark hygroskopisch und kann daher ungetränkt als Isolation nicht verwendet werden. Nur Papier zur Blechbeklebung wird meist nicht getränkt, da die Anforderungen in elektrischer Hinsicht hierfür ziemlich gering sind. Die mechanische Festigkeit muß dabei allerdings gewisse Werte aufweisen, die durch die Beanspruchung bei der Verarbeitung gegeben sind. Um einen geringen Füllfaktor und gute Wärmeleitfähigkeit zu erreichen, soll das Papier möglichst dünn sein — sogenannte Seidenpapiere. Die Saugfähigkeit darf nicht zu groß sein, damit der Klebstoff das Papier nicht durchdringt.

Papiere allein wurden zur Isolation von Dynamodrähten bisher weniger benutzt. In der Verbindung mit einmal Baumwolle ist die Papierisolation für Runddrähte von 0,8 mm ab in DIN VDE 6436 genormt. In Umstellung von Baumwolle wird man Papier allein als PP-Isolation verwenden können, wenn die Biegeradien der

Wicklungen nicht zu klein genommen werden. Auch Profildrähte lassen sich mit Papier isolieren; dabei muß aber die Mindestbreite des Profilquerschnittes in Rücksicht auf die Falzfähigkeit der Papiere breiter als bei Baumwollisolation gewählt werden. Allerdings dürfte der Isolationsauftrag etwas höher als bei der Baumwollisolierung sein. Eine gewisse Vorsicht verlangt das Einbringen der papierisolierten Wicklungen in die Nuten, da die Schlag- und Scheuerfestigkeit der hier zur Verwendung kommenden Kabelpapiere geringer als die von Baumwolle ist.

Weiter wird Papier bei der Herstellung von Glimmer-Erzeugnissen benutzt und hat sich als Träger der Spaltglimmerlagen gut bewährt. Aus Papier hergestellte Formstücke werden bei Nuthülsen von Hochspannungsmaschinen und Abstützungen von Wicklungen vielfach verwendet.

Zur Nutisolation wird neben profiliertem Hartpapier auch Preßspan, insbesondere als Edelpreßspan, in größeren Mengen benutzt. Dieser Preßspan soll möglichst geringe Stärke, große Biegsamkeit, Zerreißfestigkeit und Wärmebeständigkeit aufweisen. Dazu wird große Saugfähigkeit verlangt, damit der Preßspan leicht imprägniert werden kann; Anforderungen und Prüfungen sind in den VDE-Bestimmungen 0315/1935 festgelegt.

In der Praxis werden eine Reihe von Preßspanarten verarbeitet, die unter den verschiedensten Bezeichnungen, wie Antivolton, Anelektron, Lederspan (Lederit, Leatheroid), Lederpappe, Preßboard, im Handel sind. Je nach dem Verwendungszweck erfolgt die Auswahl der Rohstoffe, wobei man in Europa hauptsächlich Cellulose als Grundstoff bevorzugt, während als Hauptbestandteil der amerikanischen Preßspanarten, entsprechend der dortigen Rohstofflage, Textilfaser — Leinen und Baumwolle — verarbeitet werden; diese verleihen dem Preßspan eine höhere Festigkeit, größere Dehnbarkeit und auch bessere Wärmebeständigkeit.

An einigen Schaubildern sollen im folgenden die wichtigsten Eigenschaften von Isolierpapieren und Preßspan dargestellt werden; es handelt sich dabei um ältere und neuere Messungen, die dem Schrifttum entnommen sind. Das Verhalten in Feuchtigkeit, soweit es

den Elektromaschinenbau interessieren dürfte, ist in den Abb. 11 bis 13 veranschaulicht [2]. Die Wasseraufnahme steigt bei höherer Luftfeuchtigkeit, z. B. 100 % gegen 65 %, sehr stark an; Abb. 11. Bei Preßspan, der in die verschiedensten Formen gebogen, gefalzt oder gepreßt werden kann, kommt es vielfach auf die „Ziehfähigkeit“ an, die mit dem Feuchtigkeitsgehalt — Abb. 12 — anwächst; es

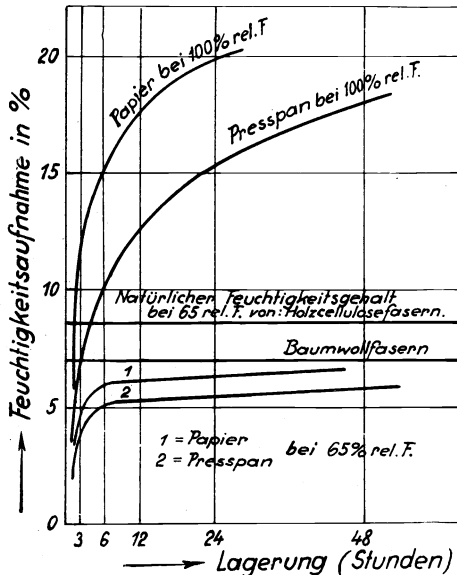


Abb. 11. Feuchtigkeitsaufnahme von Papier und Preßspan in Abhängigkeit von der Lagerungszeit bei 65 % und 100 % relativer Feuchtigkeit.

empfiehlt sich daher, Preßspan vor starker Dehnbeanspruchung auf einen günstigen Feuchtigkeitsgrad zu bringen. Nach VDE-Vorschriften 0315, § 7, soll Preßspan bei Lieferung „lufttrocken“ sein und dabei höchstens 8 Gewichtsprozent Feuchtigkeit enthalten. Die Zerreißfestigkeit von Manilapapier bei verschiedenem Feuchtigkeitsgehalt zeigt bei 10 % ein Maximum vom Doppelten des Ausgangswertes, das dann schnell absinkt — Abb. 13 —; etwa von 25 % Feuchtigkeit ab bleibt die Festigkeit mit etwa 40 % des Wertes bei Feuchtigkeit 0 konstant [8].



Der Durchgangswiderstand zeigt starke Abnahme bei steigendem Feuchtigkeitsgehalt, und zwar haben diese Kurven alle exponentiellen Charakter. Dies gilt mehr oder weniger für alle Isolierstoffe auf Cellulosegrundlage.

Die Durchschlagfestigkeit für Papiere und Preßspan in Abhän-

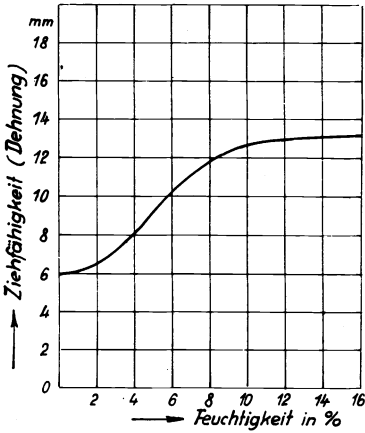


Abb. 12. Ziehfähigkeit von Preßspan in Abhängigkeit von dem Feuchtigkeitsgehalt in %.

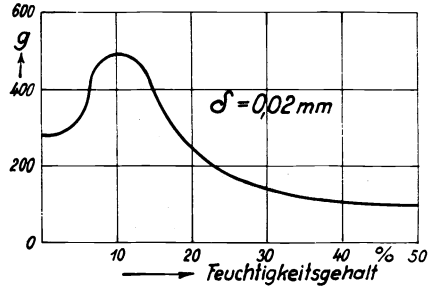


Abb. 13. Zugfestigkeit von Manilapapier in Abhängigkeit von dem Feuchtigkeitsgehalt in %.

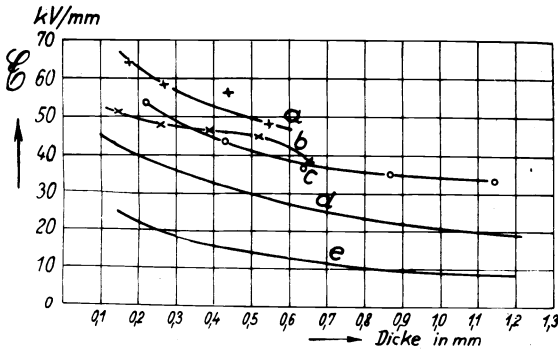


Abb. 14. Durchschlagfestigkeit  $\mathcal{E}$  von Lackpapier, Hornfaser und Preßspan für verschiedene Lagenzahl.

gigkeit von der Dicke und der Feuchtigkeit geben die folgenden Abbildungen.

Ältere Messungen sind in Abb. 14 angegeben; die Durchschlagfeldstärke  $\mathcal{E}$  nimmt mit der Dicke des Papiere — erhöhte Lagen-

zahl — ab. Kurve *a* gilt für Exzelsiorpapier Nr. 0 mit einer Papierstärke je Lage von  $\delta = 0,08$  mm; Kurve *b* für Exzelsiorpapier Nr. 1,  $\delta = 0,13$  mm; Kurve *c* für solches Nr. 4,  $\delta = 0,21$  mm; Kurve *d* für geöltes Hornfiber und Kurve *e* für geölten Preßspan [13].

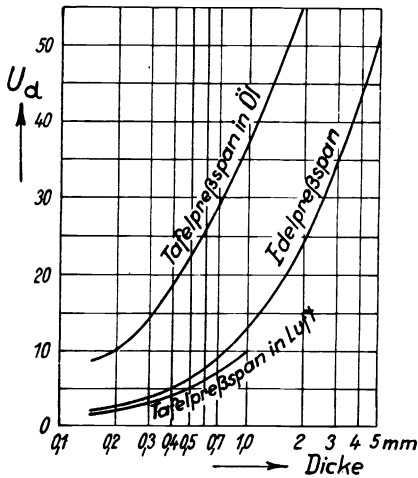


Abb. 15. Mindestwerte der Durchschlagspannung  $U_d$  nach VDE 0315, § 12 für verschiedene Preßspanarten in Öl und Luft abhängig von der Plattendicke.

In der Abb. 15 sind die Mindestwerte der Durchschlagspannung für Preßspan in Abhängigkeit von der Dicke entsprechend den VDE-Vorschriften 0315, § 12 aufgetragen, und zwar für die beiden Sorten: Tafel- und Edelpreßspan. Alle Proben sind je 1 Stunde pro 0,1 mm Dicke, aber mindestens 6 Stunden in der Luft zu trocknen. Die Hälfte der angegebenen Durchschlagspannung muß bei allen Preßspanarten erreicht werden, wenn zur Trocknung noch die Doppelfalzung als weitere Vorbehandlung tritt. Die

Durchschlagspannung unter Öl liegt natürlich erheblich höher als die in Luft; als Vorbehandlung kommt dabei neben der Trocknung in Luft noch eine Lagerung von mindestens 6 Stunden oder je 1 Stunde pro 0,1 mm Dicke in Öl bei  $105^{\circ}\text{C}$  in Betracht. Rollenpreßspan muß im wesentlichen die Durchschlagswerte von Edelpreßspan erreichen.

Die beiden nächsten Abb. 16 und 17 zeigen den Feuchtigkeitseinfluß auf die Durchschlagspannung; der kritische Wert der relativen Luftfeuchtigkeit  $\varepsilon$  liegt bei etwa 40%; dabei ist vorausgesetzt, daß die Probe — in Abb. 16, Papier — sich völlig im Feuchtigkeitsgleichgewicht befindet. Für Rollenpreßspan von 0,5 mm Dicke ist ebenfalls ein kritischer Wassergehalt  $F$ , und zwar von etwa 7% vorhanden — Abb. 17 —, von diesem Wert an nimmt die Durchschlagspannung, die hier für zwei verschiedene Sorten in % des Ausgangswertes bei

Feuchtigkeitsgehalt 0 aufgetragen ist, ähnlich wie bei der im vorhergehenden Bild dargestellten Kurve für Papier sehr schnell um erhebliche Beträge ab [2].

Die den Elektromaschinenbauer besonders interessierende Frage der Alterung wird in den folgenden Abb. 18 bis 21 behandelt, die

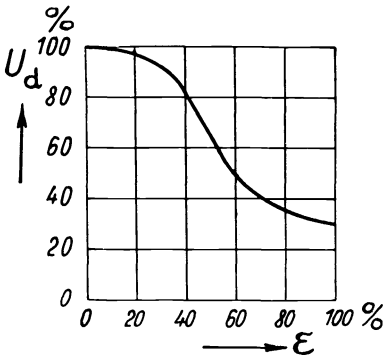


Abb. 16. Durchschlagspannung  $U_d$  in % von Papier in Abhängigkeit von der relativen Luftfeuchtigkeit  $\varepsilon$ .

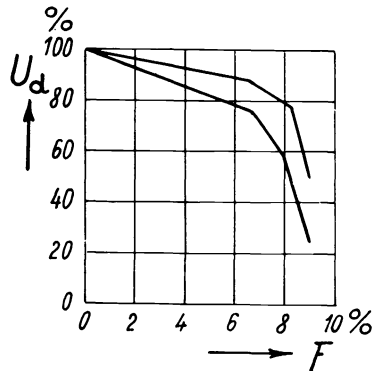


Abb. 17. Durchschlagspannung  $U_d$  in % für zwei verschiedene Sorten Preßspan in Abhängigkeit von dem Feuchtigkeitsgehalt.

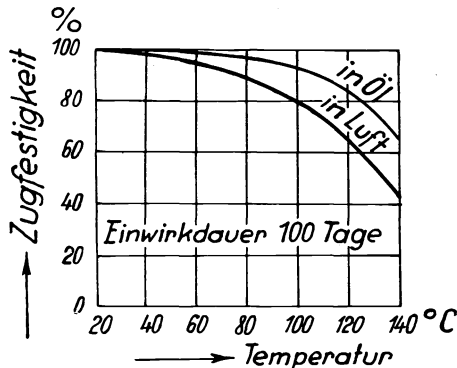


Abb. 18. Wärmebeständigkeit von Papier in Öl und Luft, gemessen als Zugfestigkeitsabnahme bei konstanter Temperatur-Einwirkdauer.

älteren Messungen von Schüler und neueren von Hill aus dem Jahre 1939 darstellen. Schüler hat im Auftrage des VDE im Jahre 1916 Alterungsmessungen an Papier und Baumwolle durchgeführt

zwecks Bestätigung der damaligen Grenzerwärmung für die Isolationsklasse A [14]. Aufgetragen ist für Papier die Abnahme der Zugfestigkeit von der Temperatur; als Parameter der Einwirkdauer der Temperatur ist jeweils die Zeit angesetzt, nach der sich, nach Ansicht von Schüler, die Zugfestigkeit trotz Temperatureinwirkung nicht weiter verringert, sondern auf einem konstanten Wert verharret. In Wirklichkeit ändern sich die mechanischen Eigenschaften aber bei dauernder Temperatureinwirkung fortlaufend, wenn auch z. B. die

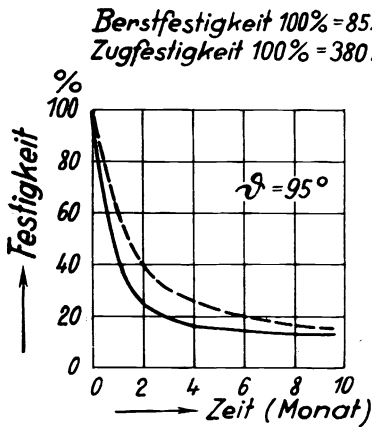


Abb. 19. Wärmebeständigkeit von ölgetränktem Preßspan, gemessen in % der Zug- und Berstfestigkeit bei konstanter Einwirktemperatur.

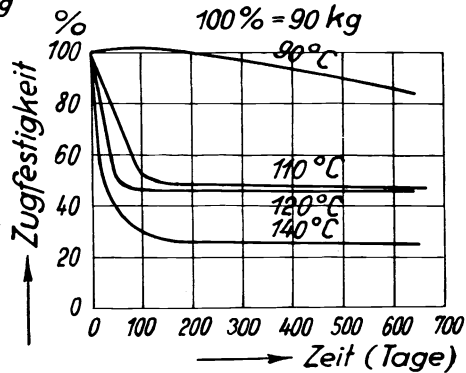


Abb. 20. Wärmebeständigkeit von Preßspan, gemessen in % der Zugfestigkeit bei jeweils konstanter Einwirktemperatur.

Abnahme der Zugfestigkeit für Papier nach 100 Tagen Temperatureinwirkung bedeutend geringer ist als vorher. Die Alterung vollzieht sich anfänglich schnell und verlangsamt sich nach einer gewissen Zeit, ohne indes je völlig aufzuhören. Charles Hill veröffentlichte in den AJEE. 1939 seine Untersuchungen über Temperaturgrenzen von Öl und Cellulose-Isolation, und zwar Hartpapier und Preßspan, die sich zum Teil über 2 Jahre Versuchsdauer erstrecken. Die folgenden Schaubilder sind seiner Arbeit entnommen [15]. In Abb. 19 ist die Abnahme der Zug- und Berstfestigkeit eines 3 mm ölgetränkten Preßspans bei der Einwirkung einer Temperatur von 95°C aufgetragen. Die Versuche wurden in Luft durchgeführt. Der Festigkeitswert im Anlieferungszustand ist gleich 100% gesetzt.

Aus Abb. 20 geht hervor, daß für Preßspan eine „kritische“ Temperatur existiert zwischen 90 und 110° C, bei der sich starke Änderungen in der Abnahme der Zugfestigkeit beim Altern ergeben. Der Versuch wurde in einer Stickstoffatmosphäre vorgenommen, um Oxydationseinflüsse auszuschalten. Hill bestätigt außerdem Schüler; etwa bei 100 Tagen Einwirkdauer zeigt sich eine starke Änderung der Zugfestigkeitsabnahme; demgemäß tritt nach den Messungen von Hill neben die kritische Temperatur noch der Begriff der kritischen „Einwirkdauer“.

Ähnliches drückt die letzte Abb. 21 dieses Abschnittes für 0,063 mm starkes Papier aus. Der Versuch diente der Nachahmung der Verhältnisse in flüssigkeitsgekühlten Transformatoren. Verwendet wurde eine nicht oxydierende Isolierflüssigkeit in einem geschlossenen Behälter. Über dem Flüssigkeitsspiegel befand sich: Luft beim Versuch *A* und Stickstoff beim Versuch *B*.

Ausgangswerte ungealtert sind gleich 100% gesetzt. Die Zeit ist einheitlich für jede Temperatur zu 95 Tage genommen, da nach den Versuchen sich diese Zeit als ausreichend für nahezu Festigkeitskonstanz erwiesen hat („kritische“ Einwirkdauer). Der Knickpunkt der Zugfestigkeitskurve liegt bei 90° C („kritische“ Temperatur).

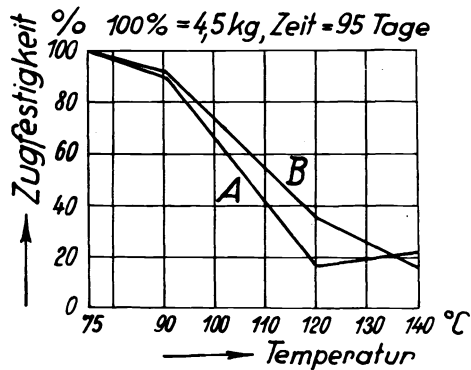


Abb. 21. Wärmebeständigkeit von 0,063 mm starkem Papier, gemessen in % der Zugfestigkeit für konstante Einwirkdauer.

### e) Anorganische Isolierstoffe

Organische Isolierstoffe leiden durchweg in ihrer Verwendungsfähigkeit, bei sonst für den Elektromaschinenbau sehr brauchbaren Eigenschaften, unter einer geringen Wärmebeständigkeit, die eine nennenswerte Überschreitung der 100°-Grenze in Dauerbean-

spruchung verbietet. Auch eine Veredlung durch besondere Behandlung etwa lackieren oder tränken, bringt keine wesentliche Verbesserung dieser Temperaturgrenze. Man muß schon zu anorganischen Grundstoffen greifen, wenn man eine Isolation mit höherer Wärmebeständigkeit schaffen will. Bekannt und vielfach in der Praxis verwendet sind bisher als anorganische Isolierstoffe: Asbest und Glimmer, so daß im folgenden hierüber nur das Wesentlichste, soweit es zum Vergleich mit „neuen“ Stoffen dienen kann, berichtet werden soll.

1. Asbest. Die Asbeste, monokline Kristalle, werden in zwei große Hauptgruppen eingeteilt:

1. Faserige, wasserhaltige Arten:

Serpentine.

Fundort: Kanada, Farbe: weiß.

Sibirien, Farbe: weiß.

2. Hornblendenasbeste.

Fundort: Rußland, Farbe: blau.

Südafrika, Farbe: gelb.

Asbest ist also reines Auslandsprodukt.

Zur ersten Gruppe gehört das Chrysotil (Magnesium-Silikat). Es hat sehr feine, glatte und bis zu 100 mm lange, gut verspinnbare Fasern von hoher Zugfestigkeit, ist allerdings nicht säurebeständig. Bei etwa 600° C tritt das Kristallwasser aus.

Zur zweiten Gruppe gehört als meist verwendet das Crocidolit (Eisen-Natrium-Silikat); dieses besitzt Fasern von geringerer Feinheit und auch geringerer Länge — bis etwa 75 mm —, dagegen ist es säure- aber nicht so temperaturbeständig.

Im Schrifttum geben verschiedene Abhandlungen Aufschluß über Eigenschaften üblicher Asbestarten bzw. die Zusammensetzung von Serpentin-asbesten, die wegen ihres geringen Eisenoxydgehaltes für elektrotechnische Isolierzwecke besonders in Betracht kommen [2, 16].

Die Asbestfasern haben im Gegensatz zu den organischen Fasern keinen Kapillarraum, sondern bestehen ganz aus kristallinem Material; sie sind auch nicht hygroskopisch, zeigen aber an der Oberfläche

meist eine Wasserschicht, die durch Erwärmen verdunstet werden kann. Zum Oberflächenschutz gegen Feuchtigkeit können sie in Lack getränkt werden, wobei der Lack aber nicht in die Fasern eindringt, sondern nur einen Überzug bildet. Man wird deshalb hier auch keine so große Verbesserung der elektrischen Eigenschaften erreichen, wie z. B. durch Tränken der Baumwolle. Bei Verwendung zu Isolationszwecken müssen alle Einschlüsse, besonders Eisen, entfernt werden. Die Festigkeit der Asbestfaser ist nicht sehr groß; ihre Reißlänge beträgt etwa 0,5 bis 1,5 km bei etwa 6% Dehnung gegen 18 bis 25 km bei Baumwolle und 25 bis 35 km bei Naturseide. Man mischt daher bei der Herstellung von Asbestgarnen zur Erhöhung der Festigkeit die Asbestfasern mit organischen Faserstoffen, so daß bei 8% Baumwollzusatz die Reißlänge etwa 2,5 km und bei 15% etwa 5 km erreicht; dadurch sinkt allerdings die Temperaturbeständigkeit.

Asbest wird zu Garnen, Gespinsten, Papieren und Pappen verarbeitet und dient ferner unter der Bezeichnung „Asbestmehl“ und „Mikroasbest“ mit sehr kurzen, nicht verspinnbaren Fasern von 1 bis 2 mm Länge als Füllstoff für Kunstharze. Die Asbestgarne werden nach der metrischen Nummer bezeichnet.

Dynamodrähte können mit Asbest besponnen, beflochten oder ummantelt werden. Der Isolationsauftrag ist höher als bei Baumwolle. Durch die Ummantelung wird eine zusammenhängende Asbestschicht von gleichmäßiger Dicke erzielt. Solche Drähte besitzen eine Dehnung von 10% und können um einen Dorn vom sechsfachen Drahtdurchmesser gebogen werden, ohne Risse oder Verschiebungen der Isolation zu zeigen. Wenn Asbest frei von organischen Fasern verwendet wird, kann nach Firmenangabe der so isolierte Draht 300° C ohne wesentliche Minderung seiner elektrischen Eigenschaften aushalten. Allerdings verflüchtigt sich bei dieser Temperatur der als Oberflächenschutz dienende Tränklack.

In Abb. 22 ist die Spannungsfestigkeit  $\mathcal{E}$  in Abhängigkeit von der Dicke für nicht lackierten Trockenasbest angegeben [17]. Weitere Eigenschaften von Asbest werden später beim Vergleich mit neuen Isolierstoffen in einer Reihe von Abbildungen zur Darstellung kommen.

2. Glimmer. Glimmer sind basische Silikate, die dem monoklinen Kristallsystem angehören. Nach ihrer Zusammensetzung kann man unterscheiden:

1. Kaliglimmer oder Muskowit, Fundort: Britisch Indien, USA.
2. Magnesiaglimmer; Biotit und Phlogopit (Amberglimmer), Kanada, Madagaskar.
3. Natriumglimmer, Paragonit.
4. Lithiumglimmer, Zinnwaldit und Lepidolit.

Die hauptsächlichsten Vorkommen befinden sich in Britisch-Indien, Kanada, USA., in geringeren Mengen wird er gefunden

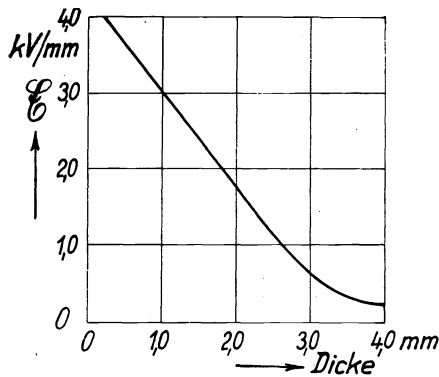


Abb. 22. Spannungsfestigkeit  $E$  von nicht lackiertem Trockenasbest in Abhängigkeit von der Dicke.

in Deutsch-Ostafrika, Südamerika und Madagaskar. Glimmer ist also Auslandsprodukt. Der Preis, der verhältnismäßig hoch ist, hängt außer von der Qualität noch von der Größe der Platten ab, die in acht Stufen gehandelt werden; die Stufe extra hat Größen über  $315 \text{ cm}^2$  ( $48''^2$ ), die achte Stufe — Bezeichnung VI —  $10$  bis  $18 \text{ cm}^2$ .

Als Isoliermaterial werden in der Hauptsache die beiden ersten Glimmersorten verarbeitet, wobei  $85\%$  des elektrotechnisch verwerteten Glimmers auf Muskowit, die verbliebenen  $15\%$  im wesentlichen auf Amberglimmer entfallen.

Die Anwendungsmöglichkeit des Glimmers richtet sich, abgesehen von der Art, nach der Qualität, die durch Farbe, Einschlüsse, Oberflächenbeschaffenheit beurteilt wird.



Im Elektromaschinenbau wird Glimmer wegen seiner hohen Durchschlagfeldstärke, Abb. 23 [8], und großen Temperaturbeständigkeit, verbunden mit einer gewissen Elastizität geschätzt. Muskowit gibt je nach Sorte bei 550 bis 650° — Calcinationspunkt — sein Kristallwasser ab und zerfällt, Amberglimmer bei 750 bis 900°, während Lepidolit nicht hitzebeständig ist. Allerdings sind die einzelnen Glimmerarten in Rücksicht auf deren beschränkte Abmessungen in ihrem Naturzustand als sogenannter Rohglimmer nur selten brauchbar; man benutzt jedoch seine Spaltbarkeit zur Herstellung von Glimmererzeugnissen in Platten und Rollenform, die

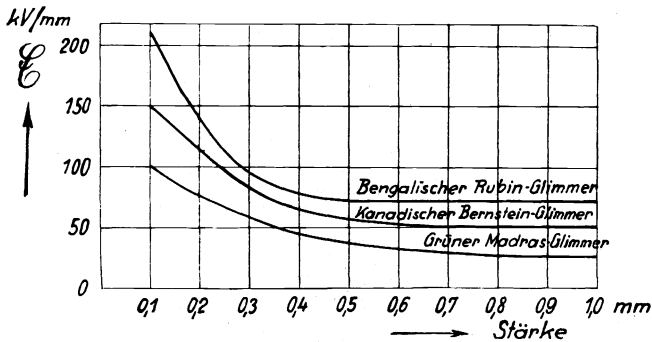


Abb. 23. Spannungsfestigkeit  $\mathcal{E}$  verschiedener Glimmersorten in Abhängigkeit von der Stärke.

in für die praktische Verarbeitung ausreichenden Dimensionen herstellbar sind.

Diese Glimmererzeugnisse werden im Elektromaschinenbau besonders wegen ihrer guten dielektrischen Eigenschaften zur Nutisolation von Hochspannungsmaschinen und wegen ihrer guten mechanischen und elektrischen Eigenschaften zur Stromwenderherstellung verwendet. Die große Wärmebeständigkeit kann seltener ausgenutzt werden, da es oft nicht möglich ist, auch die Leiter mit hochwärmebeständigen Glimmerprodukten zu isolieren.

Phlogopit ist mürber und weicher als Muskowit oder Biotit; da es sich deswegen an den Kanten leicht abreibt, wird es meist zur Lamellenisolation bei kleinen und kleinsten Kommutatoren verwendet. Bei größeren Stromwendern hilft man sich durch Auskratzen der

Lamellenisolation, so daß hier meist Muskowit verarbeitet werden kann. Als Isolation gegen hohe Spannungen ist am besten Muskowit höchster Qualität geeignet.

Durch den hohen Preis und die ausländische Herkunft bleibt seine Anwendung naturgemäß auf die notwendigsten Fälle beschränkt.

*a) Glimmererzeugnisse.* Glimmer in dickeren Schichten, 0,3 bis 4,0 mm, wird unter dem Namen Natur- oder Blockglimmer gehandelt. Wird er zu dünnen Plättchen, etwa 80 Blatt auf 1 mm Blockglimmer, aufgespalten, nennt man ihn Spaltglimmer, der in bester Qualität in der sogenannten Buchform im Handel ist. Dieser Spaltglimmer, zu dessen Herstellung meist Muskowit verwendet wird, stellt das Ausgangsprodukt für die verschiedenen in der Elektrotechnik angewandten Glimmerisolistoffe, der sogenannten Mikarite, dar. Namen, Güte und Zusammensetzung dieser Fertigfabrikate in Platten und Rollenform sind in den VDE 0332 festgelegt.

**Kommutatormikanit.** Dieser wird aus Spaltglimmer mit geringem Bindemittelzusatz von nicht über 4% unter Hitze und hohem Druck hergestellt. Er dient zur Isolation der Stromwenderlamellen untereinander und gegen die Welle. Durch Schleifen kann Kommutatormikanit auf Dicken gebracht werden, die ohne Zulassung einer Minustoleranz höchstens + 0,02 mm vom Sollwert abweichen. Der Einminutenwert der Durchschlagfeldstärke soll nach VDE 7000 V/mm erreichen, liegt aber meist über diesem Wert. Die gute Eignung des Glimmers im Kommutatorbau ist bekannt und wird bisher für größere Stromwender durch kein anderes Isoliermaterial übertroffen.

**Form- oder Braun-Mikanit** ist nur warm verformbar, in kaltem Zustand jedoch hart; es enthält bis zu 25% Bindemittel. Je größer der Zusatz an Klebemitteln, desto besser kann Mikanit gebogen werden. Die geeignete Verformungstemperatur beträgt etwa 100° C. Die Durchschlagfeldstärke soll nicht unter 9 kV/mm liegen. Hauptsächlich wird es zu Nuthülsen und Stromwenderkappen verarbeitet und ist zur Herstellung von Nutisolation bei Hochspannungsmaschinen fast unersetzlich.

Biege- oder Flexibel-Mikanit mit ebenfalls bis zu 25% Bindemittel kann im Gegensatz dazu in kaltem Zustand geformt und daher dem jeweiligen Verwendungszweck gut angepaßt werden. Die Durchschlagfeldstärke soll über 6 kV/mm liegen. Die Stärke ist 0,8 bis 1 mm. Um das Abblättern der Glimmerplättchen zu verhüten, wird Biegemikanit mit Seidenpapier der Stärke 0,03 oder mit Leinen der Stärke 0,1 mm ein- oder beidseitig verklebt als Mikanit-Papier oder Mikanit-Leinen in den Handel gebracht.

Glimmer-Papier, Glimmer-Batist und Glimmer-Seide, die auch in Bandform auf dem Markt sind, haben nur eine Glimmerschicht und können als Isolation von Profil- und Nutleitern benutzt werden.

Mikafolium, das aus Papier mit 30 bis 50 g/m<sup>2</sup> und einer mit Lack aufgeklebten Glimmerschicht, die nochmals lackiert ist, besteht, dient zur Herstellung von Nutenhülsen oder zur Umpressung von Leiterbündeln und Spulen. Die handelsüblichen Dicken sind 0,15 bis 0,30 mm. Die Durchschlagfeldstärke liegt bei 15 bis 20 kV/mm. Weiter wird Biege-Mikanit ein- oder beidseitig mit Preßspan beklebt hergestellt. Man erhält hierdurch größere mechanische Festigkeit. Dagegen sind die Wärmebeständigkeit und auch die Durchschlagfeldstärke geringer als bei unbelebtem Biegemikanit.

### C. „Neue“ Isolierstoffe

Die Forderungen des Vierjahresplanes mußten auf dem Gebiete des Elektromaschinenbaues besonders starke Umstellungsbestrebungen in den Isolierstoffen auslösen, da diese, wie erwähnt, in ihrer Mehrzahl auf ausländischer Rohstoffbasis beruhten. Diese Umstellung darf aber keine Verschlechterung gegenüber den bisher benutzten Isoliermitteln bringen, da jede Qualitätsverminderung der Isolation in irgendeiner Hinsicht, sei es mechanischer, elektrischer oder thermischer Art, eine Erhöhung des aktiven Materials der elektrischen Maschine, also einen Mehraufwand an Eisen und Kupfer, die ihrerseits ebenfalls zum Teil oder ganz devisa-belastete Stoffe sind, zur Folge haben muß. Bei den starken Anteilen von Eisen

und Kupfer am Gesamtwerkstoffaufwand einer elektrischen Maschine hätte sich leicht die Devisenersparnis an Isolierstoffen in einen Devisenverlust durch Mehraufwand an aktivem Material wandeln können.

Eine Reihe der „neuen“ heimischen Isolierstoffe ist schon seit längerem bekannt; aus verschiedenen Gründen, etwa finanzieller, fabrikatorischer Art u. ä., hat man diesen Stoffen wenig Beachtung geschenkt, da die bestens erprobten ausländischen Isolierstoffe, wie Baumwolle, Naturharze, Glimmer, Asbest usw., in genügender Menge zu vorteilhaften Preisen zur Verfügung standen. Die Ergebnisse der Kunststoffchemie, als der Chemie „der synthetisch organischen Werkstoffe“, eröffneten auch ungeahnte Möglichkeiten zur Schaffung neuer, hochwertiger Isolierstoffe. Die Erfolge des Vierjahresplanes in der Stoffkunde geben die Gewißheit, daß eine Anfangsstufe großer neuer, in stärkstem Fluß befindlicher Entwicklungen auch auf dem Gebiet der elektrischen Isolierstoffe gewonnen ist, deren Umfang und Endergebnis noch gar nicht zu erkennen sind. Daher können auch über die im folgenden zu behandelnden „heimischen“ Isolierstoffe Erfahrungen kaum mitgeteilt werden.

Entsprechend der Einteilung in die Gruppen der bekannten und im vorhergehenden behandelten Isolierstoffe auf vielfach ausländischer Rohstoffbasis seien aus der großen Gruppe der Kunststoffe zunächst die Lackrohstoffe, und zwar die hierfür geeigneten organischen Kunstharze herausgegriffen, denen dann die ebenfalls organischen Kunstfasern in der Besprechung folgen mögen, um schließlich mit anorganischen Isoliermitteln auf Heimstoffgrundlage die Reihe der „neuen“ Isolierstoffe zu beenden.

### a) Kunstharze

1. Allgemeines. Kunstharze können im Elektromaschinenbau in ihrer eigentlichen festen, gehärteten Form meist nur zu untergeordneten Zwecken, wie zu Klemmenbrettern, Abstützungen u. dgl. verwendet werden. Da jedoch Kunstharze zur Lackherstellung immer mehr Verwendung finden, in besonderen Fällen auch als Folien zur Drahtisolation benutzt werden können, soll eine

kurze Zusammenstellung der wichtigsten hierfür in Frage kommenden Kunstharze mit ihren Eigenschaften gebracht werden.

Ein Kunstharz, das allen Anforderungen gleich gut gewachsen ist, gibt es nicht. Die Eigenschaften der Naturharze sind durch ihre gegebene Zusammensetzung und Struktur nicht oder nur wenig zu ändern. Lediglich durch Nachbehandlung oder Veredlung ist eine Modifikation in sehr engen Grenzen gegeben. Da man Aufbau und Zusammensetzung der Kunstharze in sehr weiten Grenzen bestimmen kann, ist es möglich, damit auch deren Eigenschaften weitgehend zu beeinflussen. Allerdings wird die Herausarbeitung einer besonderen Eigenschaft ein Nachlassen anderer Eigenschaften zur Folge haben.

Man ist deshalb gezwungen, vor der Anwendung sich darüber klar zu werden, welche besonderen Anforderungen an den Stoff zu stellen sind. Wählt man dann ein Kunstharz, das diesen Anforderungen am besten entspricht, wird man bessere Ergebnisse erzielen als mit Naturharzen.

Auf Grund der Bildungsreaktion unterscheidet man zwei große Gruppen von Kunstharzen: Die Polykondensate und die Polymerisate.

Unter Polykondensation versteht man die chemische Vereinigung zweier niedrigmolekularer Ausgangsstoffe unter gleichzeitiger Abspaltung eines Reaktionsproduktes, meist Wasser, wobei die hochmolekulare Endverbindung stufenweise entsteht. Bei der Polymerisation handelt es sich um die Verkettung von Molekülen — sogenannte Monomeren — einer ungesättigten Verbindung, die aktiviert, sich zu großen, wiederum aktiven Molekülen anlagern. Die Vorgänge, die zum Abbruch dieses Wachstums führen, sind zur Zeit noch ungeklärt.

2. Polykondensate. Polykondensate in ihrer härtbaren Form haben große technische Bedeutung erlangt; diese „härtbaren Kunstharze“ sind zunächst bei nicht zu hoher Temperatur unter Druck leicht verformbar, erhärten dann aber unter chemischer Umwandlung zu einem festen, nicht erweichbaren Produkt, dessen Eigenschaften erheblich von Druck, Temperatur und deren Einwirkdauer bei der

Formung abhängen und durch Füllstoffe stark verändert werden können. In VDE 0320, § 4, Tafel I, sind die wichtigsten Kunsthharzpreßstoffe nebst ihren wesentlichen Eigenschaften aufgeführt. Zur Zeit sind die bedeutendsten Polykondensate: Phenoplaste aus Phenol-Formaldehyd, Aminoplaste aus Harnstoff-Formaldehyd. Anilin mit Formaldehyd ergibt härtbare oder nicht härtbare Harze, die unter anderem bei der Hartpapierherstellung Verwendung finden. Die Kriechstromeigenschaften sind besonders günstig.

Die Glycerin-Phthalsäure-Harze, wie die Glyptale, Alkydale, Aphenalate, werden hauptsächlich in der Lackindustrie verwendet.

3. Polymerisate. Polymerisate können in verschiedenen Polymerisationsgraden, d. h. mit verschiedenen Molekülgrößen, hergestellt werden, die bis zu Millionen von Atomen enthalten. Die Eigenschaften hängen ab vom Polymerisationsgrad. Die für die Elektrotechnik wichtigsten Stoffe sind die Polystyrole (Handelsname: Trolitul, Styroflex), die Poly-Akrylate (Plexigum, Stabol), Polyvinyle (Igelit, Mipolam, Vinifol), die Mischpolymerisate (Luvican, Oppanol), kautschukartige Stoffe wie Chloropren und die Bunasorten.

Die vorgenannten Stoffe bleiben fast alle thermoplastisch. Die Formgebungs- und Erweichungstemperatur liegt meist unter 100° C, so daß trotz bester elektrischer Eigenschaften, die Verwendungsfähigkeit der Polymerisate im Elektromaschinenbau sehr beschränkt ist. Eine gute Zusammenstellung der Kunsthharze bringen Houwink in dem Buche „Chemie und Technologie der Kunststoffe“ auf S. 586ff., ebenso Nitsche und Pfestorf in dem Buche „Prüfung und Bewertung elektrotechnischer Isolierstoffe“, S. 300ff.

## b) Kunsthharzlacke

Über die Kunsthharzlacke endgültig oder vollständig zu berichten, ist im Augenblick nicht möglich, da ihre Entwicklung sich noch im Anfangsstadium befindet und an der Verbesserung gerade dieser Isolierlacke gearbeitet wird. Es sollen daher nur die Lacke besprochen werden, die sich schon mehr oder weniger bewährt haben.

Seit längerer Zeit werden spirituslösliche Phenolharze als Lackrohstoffe verwendet. Durch Härtung in Hitze sind harte und chemisch

widerstandsfähige Lackfilme herstellbar, die aber den Nachteil großer Sprödigkeit haben. Es besteht weiter die Gefahr, daß sich beim Einbrennen porige Filme bilden, die auch zum Teil schlecht an ihrem Untergrund haften. Sie fanden zur Herstellung von Preßspan und Hartpapier als „Schellack-Ersatz“ Verwendung. Zum Kleben von Glimmer sind diese Lacke nicht geeignet, da sie an Glimmer sehr schlecht haften. Durch Zusätze von Säuren und Basen kann eine Härtung auch bei Raumtemperatur erreicht werden, doch besteht die Gefahr, daß sich freie Säuren oder Basen bilden, die das Leitermetall angreifen oder den Isolationswiderstand wesentlich herabsetzen.

Durch besondere Verfahren ist es möglich, auch kohlenwasserstofflösliche Resole herzustellen, die mit Benzol als Lösungsmittel härtbare Lacke ergeben. Diese Lacke haben gegenüber den spirituslöslichen Phenolharzen den Vorteil größerer Haftfestigkeit und geringerer Sprödigkeit. Durch Zusatz von besonderen Weichmachungsmitteln, die beim Erhitzen nicht entweichen, erhält man sogenannte plastifizierte Resole, die als Lacke verarbeitet eine gute Elastizität aufweisen, so daß sie als Drahtisolierlacke und zur Isolierung von Dynamoblechen verwendet werden können. Durch Zusatz von Sikkativen können diese Lacke sowohl für Luft- wie Ofentrocknung hergestellt werden.

Eine Sonderart der Phenole, die Alkylphenole, sind auch in fetten Ölen löslich, so daß sie auch zu Öllacken verwendet werden können. Verbindungen von Phenolen mit lacktechnisch weniger brauchbaren Naturharzen führen zu den modifizierten Phenolharzen, oder sogenannten Kunstkopalen. Mit diesen ist es möglich, Lacke herzustellen, die den Naturkopallacken insbesondere in der Beständigkeit gegen chemische Angriffe überlegen sind. Neben Leinöl und Holzöl können auch trocknende und halbtrocknende Öle pflanzlicher und tierischer Herkunft verwendet werden, damit helfen sie also, die fetten Öle zu sparen.

Die Glycerin-Phthalsäure-Harze, die unter dem Namen Glyptal besonders in Amerika empfohlen wurden, können für sich oder auch mit Nitrocelluloselacken vermischt werden und dienen hier als Weichmacher. Die Glyptale werden mit Ölen verschiedener Art,

auch Lacktran und Sojaöl, verarbeitet. Dabei spielt das Verhältnis Öl zu Glyptal für die Eigenschaften des Lackes eine maßgebende Rolle. Die Glyptallacke haben angeblich eine sehr gute Wärmebeständigkeit und verlieren auch ihre Elastizität nicht bei langdauernder Erwärmung. Sie sind zum Kleben von Mikanit statt Schellack empfohlen worden und man hat in Amerika angeblich außerordentlich gute Erfahrungen mit ihnen gemacht. Dagegen ergeben Untersuchungen von Stäger nicht die angekündigte Überlegenheit gegenüber Schellack [2].

Es liegt nahe, auch die Polymerisationsharze, wie die Polyvinyle, die gute mechanische und elektrische Eigenschaften aufweisen, zu Lacken zu verarbeiten. Dabei ergeben sich aber, im Gegensatz zu den Polykondensaten, grundsätzliche Schwierigkeiten; denn die Polymerisate liegen in ihrer endgültigen Form vor, im Gegensatz zu den Polykondensaten, wo Zwischenprodukte zur Lackherstellung Verwendung finden, die erst durch das Trocknen meistens bei höheren Temperaturen in ihren Endzustand übergehen. Die Polymerisate müssen, um als Lack verarbeitet werden zu können, in einem Lösungsmittel löslich oder in einem Dispersionsmittel emulgierbar sein. Der Filmbildungsprozeß ist dann, wie z. B. bei den Spirituslacken, ein reiner Verdunstungsvorgang; es findet also keine chemische Umsetzung statt, sondern das Ausgangspolymerisat ist nur in Filmform aufgebracht worden, hat also dieselben Eigenschaften wie der Ausgangsstoff, ist also unter anderem thermoplastisch, d. h. bei höheren Temperaturen verformbar. Schwierigkeiten ergaben sich, ein flüchtiges Lösungsmittel zu finden, das die Polymerisate löst.

Manche Harze können auch mit Nitrocellulose oder Chlorkautschuk kombiniert werden und können dann fette Öle, die als Weichmacher dienen, ersetzen.

Im allgemeinen ist eine gute Alterungsbeständigkeit festzustellen. Es kann ferner gute Beständigkeit gegen bestimmte chemische Einflüsse erreicht werden.

Den Polymerisaten ist auch der Chlorkautschuk zuzuzählen. Er ist im allgemeinen für den Elektromaschinenbau nicht brauchbar, da er sich unter Salzsäureabspaltung bei etwa 100° zersetzt.



Größere Beständigkeit soll Kautschukhydrochlorid aufweisen, das durch Einwirkung von Salzsäure auf Kautschuk entsteht.

Aus anderen Umwandlungsprodukten des Kautschuks, die harzigen Charakter aufweisen, sollen Lacke herstellbar sein, die einen Film mit größerer Porenfreiheit aufweisen als der Chlorkautschuklack, der auch bei höheren Temperaturen beständig ist.

Alle diese Kautschuklacke zeichnen sich dadurch aus, daß sie weitgehend unempfindlich sind gegen chemische Angriffe.

### c) Kunstfaserstoffe

1. Allgemeines. Der große Bedarf an Textilfasern aller Art und die starke Abhängigkeit der deutschen Rohstoffversorgung auf diesem Gebiet vom Ausland zwangen im Zuge der Bestrebungen um die wirtschaftliche Unabhängigkeit gerade im Sektor Textiltechnik zu den größten Anstrengungen, die von Erfolgen gekrönt waren. Man kann unterscheiden zwischen Kunstfasern, hergestellt aus Naturstoffen, und „synthetischen“ Fasern, hergestellt aus Polymerisationsprodukten. Als Ausgangsmaterial für die Kunstfasern auf Naturbasis kommt in der Hauptsache Cellulose (Zellstoff) in Betracht, die aus einer Reihe von Pflanzen gewonnen werden kann. Gerade in der Erschließung neuer Rohstoffquellen für Cellulose liegt heute der Schwerpunkt der Textilrohstoffforschung. Alle Pflanzen sind aus Cellulose aufgebaut; aber nur die Baumwollpflanze liefert reine Cellulose von hinreichender Faserlänge; bei den anderen Pflanzen muß diese erst von dem Lignin und den sogenannten Füllkörpern getrennt werden.

Baumwolle scheidet als Auslandsprodukt trotz der Güte und Reinheit ihrer Cellulose selbstverständlich aus. In überwiegendstem Maße liefert Holz den Zellstoff; dafür werden die in kaltem Klima und daher langsam aber gleichmäßig gewachsenen Hölzer der Fichte bevorzugt. In letzter Zeit ist es gelungen, deutsches Buchenholz zu Zellstoff zu verarbeiten. Weitere aussichtsreiche Großversuche zielen darauf hin, das in reichlichem Maße anfallende Stroh und Kartoffelkraut zur Zellstoffgewinnung heranzuziehen. Außerdem eignen sich auch bestimmte Schilfsorten zur Celluloseherstellung.

In Anlehnung an die natürlichen Fäden der Textiltechnik: Seide und Wolle bzw. Baumwolle unterscheidet man bekanntlich auch im Reich der Kunstfäden zwischen Kunstseiden und Zellwollen. Diese beiden Faserarten zeigen einige Verwandtschaft; ausgehend vom gleichen Rohstoff, der gelösten Cellulose, drückt man bei beiden Faserarten die zähe Zellstofflösung durch feine Spinn­düsen in das sogenannte „Spinn-“ oder „Fällbad“, wo die Fäden entstehen. Erst von der Spinnerei ab trennt sich die Herstellung der beiden Kunstfasern.

2. Kunstseide. Unter Kunstseide versteht man theoretisch endlos lange, aus mehreren Einzelfäden bestehende Garne, deren Länge nur durch die Aufnahmefähigkeit der Aufwickelorgane begrenzt wird. Je nach Lösungsmittel der Cellulose und der Weiterbehandlung der Fäden nach dem Spinnen unterscheidet man drei Arten der Kunstseiden:

1. Viskose-, 2. Acetat-, 3. Kupferkunstseide.

Die nach dem Viskoseverfahren hergestellte Kunstseide hat vor den anderen Arten die weitaus größte wirtschaftliche Bedeutung und umfaßt 90% der gesamten Weltproduktion. Viskosekunstseide und Kupferkunstseide sind ihrem Aufbau nach regenerierte Cellulosen, während Acetatkunstseide eine chemische Verbindung von Cellulose mit Essigsäure, eine Acetylcellulose, darstellt.

Der fertige Kunstseidenfaden besteht aus mehreren umeinandergedrehten Einzelfasern. Der Titer der Einzelfasern kann auf 0,5 den herabgedrückt werden; der von Naturseide liegt bei 1,3 den.

Die Zugfestigkeit in km Reißlänge, ebenso wie die Dehnung in %, die bei der Verarbeitung eine Rolle spielen, sind in folgender Tafel I für verschiedene Faserstoffe: Kunst-, Naturseide und Baumwolle angegeben. Es handelt sich dabei um Mittelwerte jeweils verschiedener Sorten, für die im Schrifttum stark streuende Einzelwerte zu finden sind.

Im Gegensatz zur Naturseide zeigt die Kunstseide eine Bruchdehnung, die zum allergrößten Teil nicht elastischer Natur ist.

Viskose- und Kupferkunstseide sind stärker hygroskopisch als Acetatkunstseide. Die ersteren nehmen bei 60% relativer Luft-

feuchtigkeit etwa 12 bis 13 % Wasser auf. Die letztere nur etwa 6 % (Naturseide 9,5 bis 11 %). Entsprechend der Feuchtigkeitsaufnahme zeigen Viskose- und Kupferseide mit 35 und 41 % erheblich höhere

Tafel I.

Festigkeit und Dehnung — trocken und naß — verschiedener Faserstoffe

Faserart	Reißlänge		Bruchdehnung%	
	trocken km	nass%	trocken	nass
Viscose-Kunstseide	18	50	16	18
Naturseide	44	87	17	30
Baumwolle, ägyptische	40	105	8,5	8,5

Quellung — ausgedrückt in Querschnittszunahme — als Acetatseide mit 9 bis 14 % je nach Hersteller. In Abb. 24 ist für Viskoseseide im Vergleich zu Baumwolle und Naturseide die Wasseraufnahme in

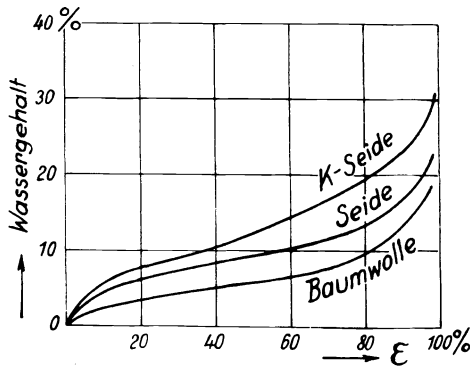


Abb. 24. Wasseraufnahme von Faserstoffen in Abhängigkeit von der relativen Luftfeuchtigkeit  $\epsilon$  in %.

Abhängigkeit der relativen Feuchtigkeit aufgetragen. Entsprechend der größeren Faserfeinheit der Kunstseide, also vergrößerter Oberfläche je Querschnittseinheit, zeigt diese die stärkste Feuchtigkeitsaufnahme.

Bei der Behandlung mit Tränkmitteln ist auf die starke Quellung der Kunstseide zu achten. Ferner dürfen nur solche Tränkmittel verwendet werden, die die Kunstseide nicht chemisch angreifen.

Der Isolationswiderstand, gemessen durch die Entladezeit eines Quadrantenelektrometers für Kunstseide, ergab für:

Kupferkunstseide .....	$2,2 \cdot 10^{-2}$ min
Viskosekunstseide .....	$4,5 \cdot 10^{-2}$ min
Acetatkunstseide .....	$2320 \cdot 10^{-2}$ min

Man erkennt die große Überlegenheit der Acetatkunstseide, die auf ihre chemische Zusammensetzung und Behandlung zurückzuführen ist.

Nach VDE 0550, § 9, Tafel II, der Bestimmung über Wärmesicherheit rangiert Kunstseide allgemein mit Baumwolle, Seide, Papier in der Grenzerwärmung „getränkt  $60^{\circ}\text{C}$ “; im einzelnen ergeben sich unter Zugrundelegung einer maximalen Festigkeitsverminderung von 5% nach Untersuchungen, die in der Praxis vorgenommen wurden, folgende Wärmebeständigkeitswerte:

Kupferkunstseide .....	$60^{\circ}\text{C}$
Viskosekunstseide .....	$70^{\circ}\text{C}$
Triacetatkunstseide .....	$80^{\circ}\text{C}$

Dabei weist Triacetatkunstseide bessere mechanische und thermische Eigenschaften auf als Acetatseide. Die Verwendung von Kunstseide an Stelle von Naturseide bringt im Elektromaschinenbau keine zusätzlichen Schwierigkeiten und stellt in mancher Hinsicht eine Verbesserung dar, wobei sie gegenüber Naturseide noch den Vorzug des erheblich geringeren Preises hat.

3. Zellwolle. Die Zellwolle besteht im Gegensatz zur Kunstseide aus kurzstapeligen Einzelfasern. Ausgangsstoff und Fadenfällung unterscheiden sich nicht von der Kunstseide. Aus dem Fällbad werden die endlosen Fasern der Schneidmaschine zugeführt, in Stapelfasern zerschnitten und dann nach einer Reihe von Reinigungsprozessen zu Fäden versponnen.

Nach dem Herstellungsverfahren der Spinnlösung unterscheidet man wie bei Kunstseide drei große Gruppen:

1. Viskosezellwolle, 2. Acetatzellwolle, 3. Kupferzellwolle.

Zur Gruppe 2 und 3 wird hauptsächlich Baumwollcellulose verarbeitet, während Viskosezellwolle, die auch hier mehr als 90 % der Zellwollproduktion umfaßt, aus Holzcellulose hergestellt wird. Innerhalb der drei Gruppen sind wieder besondere Fertigungsarten zu unterscheiden, die für verschiedene Zwecke besonders geeignete Fasern ergeben. So stellt die I. G. Viskosezellwolle in den Modifikationen: Vistra HB, CWW, WW usw. her. Die physikalischen Eigenschaften der Zellwollarten werden also in gewissen Grenzen selbst in einer der drei oben angegebenen Gruppen variieren.

Jede Herstellerfirma gibt ihren Erzeugnissen eigene Namen; so heißt z. B. die Viskosezellwolle der I. G. „Vistra“, der Vereinigten Glanzstoff-Fabriken „Flox“, der schlesischen Zellwoll A.-G. „Phrix“ usw. Zellwollfasern werden in Stärken von 1 bis 45 den hergestellt, entsprechend einem Durchmesser von etwa 10 bis 65  $\mu$ . Zellwollgarne können bei fast gleichen Festigkeitswerten mindestens ebenso fein wie Baumwollgarne fabriziert werden, so daß der Isolationsauftrag aus Festigkeitsgründen nicht größer zu sein braucht als bei Baumwolle.

In nachstehender Tafel II sind die Mittelwerte der Festigkeit in Reißlänge und der Bruchdehnung in % der Ausgangslänge für trockene und nasse Garne verschiedener Zellwollen im Vergleich zu den üblichsten Baumwollarten sowie Naturseide angegeben<sup>1)</sup>. Die einzelnen Garne sind durch Feinheit in Titer und Gütezahl gekennzeichnet.

In der Naßfestigkeit sind die Kunstfasern den Naturfasern unterlegen. Der große Bereich der Reißlänge läßt erkennen, wie sehr man bestimmte Eigenschaften bei Kunstfasern, allerdings meist auf Kosten einer anderen, heben und verbessern kann. Die hochfeste Viskosezellwolle erreicht Reißlänge trocken von 41 bis 44 km (naß 87 % dieses Wertes) gegenüber normal 18 bis 26 km (49 bis 63% naß),

---

<sup>1)</sup> Nach Angabe von Prof. Dr.-Ing. Matthes, Aachen.

allerdings geht die Bruchdehnung auf 7 bis 9% gegenüber 11 bis 20% bei der normalen baumwollfeinen Zellwolle zurück; sie ist selbst mit ihrer Naßfestigkeit den üblichen Baumwollarten (good middling)

Tafel II.  
Mechanische Eigenschaften von Zell- und Baumwolle

Faserart	Feinheit den	Gütezahl p. S/den	Reißlänge trocken/nass %		Bruchdehnung % trocken/nass		
Viscose-Zellwolle	baumwollfein	13-20	20-29	18-26	48-63	11-20	9-26
	hochfest	1,2	4,5-4,9	41-44	81-86	7-9	7-9
Kuoxom-Zellwolle	baumwollfein	14	2,5-2,7	22-24	54-58	18-19	17-19
Azetat-Zellwolle		2,6-3,5	1,4-1,8	13-16	58-70	16-31	26-45
Kasein-Spinnfaser		3,5-5,0	0,9-1,0	8-9	50-54	7-50	83-110
Baumwolle	amerikanisch ostindisch	2,0-3,7	2,3-2,9	21-25	18-105	7-10	7-11
	ägyptisch, sen Island, Georgiol	1,0-1,7	3,4-5,9	30-53	102-107	8-9	8-9
Naturseide		1,2	4,9	44	87	17	30

Tafel III.  
Trocken- und Naßfestigkeit von Baumwolle und verschiedenen Zellwollarten

Garn	$N_m$	Festigkeit $K_z$ in g trocken/nass %		$\Delta$ g%
Baumwolle	40,80	227,89	365,05	+61,67
Azetat	40,90	123,85	82,61	-33,34
Flox	39,82	332,73	180,27	-45,90
Duraflox	39,98	404,72	216,73	-46,40

überlegen. Andere Messungen — Tafel III — ergeben ähnlichen Rückgang der Naß- gegenüber der Trockenfestigkeit bei Zellwollgarnen und bestätigen aber das hier besonders stark umgekehrte Verhalten bei Baumwolle. Die Festigkeitsunterschiede bei Zellwolle stehen hier im Verhältnis 1 : 3, Acetat: Duraflox<sup>1)</sup>.

<sup>1)</sup> Nach Angabe von Prof. Dr.-Ing. Johansen, Reutlingen.

Abb. 25 gibt die Feuchtigkeitsaufnahme verschiedener Natur- und Kunstfaserstoffe in Abhängigkeit von der relativen Luftfeuchtigkeit an; hierbei zeigen Acetatzellwolle und Viskoseseide die größten Gegensätze, ein Beweis für die Verschiedenheit künstlicher Fasern; die Naturfasern, wie Wolle, Seide usw. liegen mit ihren Werten zwischen den beiden Grenzkurven [11].

Die Schabefestigkeit von zweimal zellwollisolierten, ungetränkten Dynamodrähten, ausgedrückt in Umdrehungen des Schabewerkes,

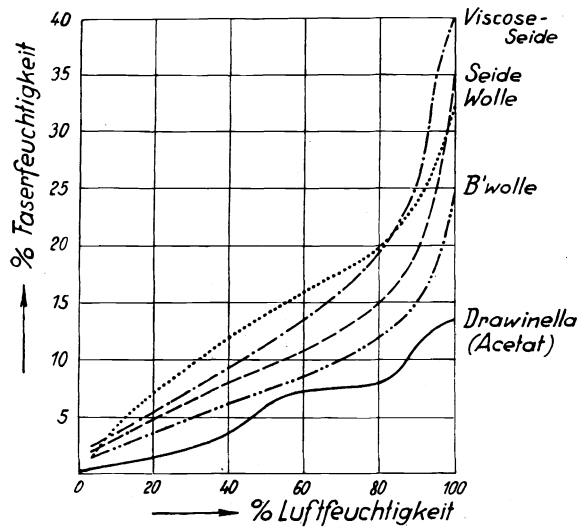


Abb. 25. Feuchtigkeitsaufnahme verschiedener Natur- und Kunstfasern in Abhängigkeit von relativer Luftfeuchtigkeit  $\epsilon$  in %.

betrug nach eigenen Messungen bei 1,3 mm Drahtdurchmesser blank und 200 g Belastung des Drahtes im Mittel 2900 gegen 7800 für Baumwolle zweimal umspinnen und 920 für Seide zweimal umspinnen. Bezogen zum Vergleich auf 1 mm Isolationsauftrag einseitig, ergeben sich folgende Verhältnisse: Baumwolle  $71 \cdot 10^3$ , Seide  $23 \cdot 10^3$ , Zellwolle  $25,4 \cdot 10^3$ . Für Dynamodrähte: Lack + einmal Zellwolle und Lack + einmal Baumwolle lauten die entsprechenden Umdrehungszahlen 660 gegen 3950. Vernachlässigt man die Scheuerfestigkeit des Lackes, so fällt die geringe Drehzahl für Zell-

wolle auf, die wohl auf das leichtere Gleiten der glatten Zellwollfäden auf der blanken Lackoberfläche zurückzuführen ist. Bei Baumwolle gehen die Umdrehungszahlen proportional mit der Dicke des Faserauftrages zurück.

Zweifellos ist Zellwolle der Naturfaser Baumwolle in der Scheuerfestigkeit unterlegen, übertrifft aber noch die Seide an Schabefestigkeit. Gemessen an Lackdrähten mit mittleren Schabezahlen von  $1,2 \cdot 10^3$  U/mm ist die Scheuerfestigkeit von Zellwolle mit dem 20fachen Wert der Lackisolation weit überlegen; dabei reicht die Schabe- und Scheuerfestigkeit der Lackdrähte, die im Elektromaschinenbau in großen Mengen verarbeitet werden, bekanntlich völlig aus, so daß dieser Nachteil der Zellwolle gegenüber Baumwolle entsprechend den vorgenannten Zahlen gar nicht ins Gewicht fällt.

Über die Alterungsbeständigkeit der Zellwollen liegen Messungen für größere Temperatureinwirkdauer, etwa über Monate, im Schrifttum bisher nicht vor. Lediglich die Versuchsergebnisse mit beim Trocknen der Kunstfasern üblichen Temperaturen und Zeiten sind bisher bekannt. In einer ersten Meßreihe wurden die Garne der Tafel III Temperaturen von 100, 120 und 132°C je 6, 12 und 24 Stunden ausgesetzt. Das Ergebnis ist in Tafel IV<sup>1)</sup> zusammen-

Tafel IV.

Festigkeit und Dehnung von Baumwolle und verschiedenen Zellwollarten bei kurzzeitiger Alterung

Faserart	Eigenschaft	Raumtemperatur	6 Stunden			12 Stunden			24 Stunden		
			100°C	120°C	132°C	100°C	120°C	132°C	100°C	120°C	132°C
Baumwollgarn.	Reißlänge km	966	770	741	687	742	662	726	662	570	693
	Änderung %	± 0	-16,3	-20,4	-26,2	-20,2	-28,8	-24,9	-28,8	-38,7	-25,3
	Dehnung mm	27,4	21,0	18,6	16,9	18,0	17,9	24,0	22,2	20,5	
	Änderung %	± 0	-23,4	-32,0	-38,2	-34,4	-34,6	-23,3	-17,0	-19,0	
Azetatgarn.	Reißlänge km	5,07	4,76	5,71	5,49	5,82	5,68	5,49	4,59	3,38	5,45
	Änderung %	± 0	-6,0	+12,6	+2	+14,9	+12,1	+3,3	-34	-33,4	+7,5
	Dehnung mm	44,1	47,1	47,5	40,6	44,2	45,3	43,1	44,4	40,8	44,1
	Änderung %	± 0	+11,5	11,6	-15	+7,0	+10,0	+3,0	+7,5	-1,0	+7,0
Flaxgarn	Reißlänge km	13,25	14,44	14,87	15,59	15,06	15,26	15,28	16,63	15,59	15,09
	Änderung %	± 0	+9,0	+12,0	+17,5	+14,0	+15,0	+15,0	+26,0	+17,5	+7,0
	Dehnung mm	61,45	54,9	39,4	40,02	49,0	45,9	38,4	41,7	36,8	36,1
	Änderung %	± 0	-10,5	-31,0	-34,5	-20,0	-25,0	-37,5	-32,0	-40,0	-41,0
Dunafloxgarn.	Reißlänge km	15,78	17,02	16,68	19,00	17,58	16,87	18,69	19,07	20,26	18,18
	Änderung %	± 0	+8,0	+5,5	+20,5	+11,5	+7,0	+15,0	+20,5	+29,0	+15,0
	Dehnung mm	60,5	52,7	44,04	46,9	57,3	45,6	44,4	48,9	44,8	41,7
	Änderung %	± 0	-13,0	-27,2	-22,5	-15,0	-24,2	-26,5	-19,0	-25,8	-31,0

<sup>1)</sup> Nach Angabe von Prof. Dr.-Ing. Johannsen, Reutlingen.



gefaßt. Gegenüber der Abnahme der Reißlänge von Baumwolle bei Alterung zeigten die Zellwollgarne mehr oder weniger sogar eine Verfestigung, während die Abnahme der Dehnung bei den Floxgarnten sich in den Grenzen der Dehnungsänderung von Baumwolle hält. Acetatgarne zeigen geringen Einfluß der Alterung auf die Dehnung. In einer zweiten Meßreihe wurden Zellwollgarne: Flox —  $N_m = 34,5$  — Flox —  $N_m = 17,5$  — und Phrix —  $N_m = 35,4$  — 24stündiger Alterung bei 110 bis 150° C unterworfen, dann mindestens zweimal 24 Stunden einer 65% relativer Luftfeuchtigkeit ausgesetzt und danach gerissen<sup>1)</sup>. Tafel V.

Tafel V.  
Festigkeit und Dehnung verschiedener Zellwollgarne  
bei kurzzeitiger Alterung

Faserart	Eigenschaft	Raum- temperal	110° C	120° C	130° C	140° C	150° C
Floxgarn, einfach $N_m = 35,4$	Reißlänge km	14,16	14,23	13,56	13,04	12,00	11,44
	Änderung %	± 0	+0,47	-4,27	-1,94	-15,28	-13,20
	Dehnung mm	58,6	60,7	64,1	62,4	53,2	51,8
	Änderung %	± 0	+3,5	+9,5	+6,3	-9,9	-1,2
Floxgarn $N_m = 17,5$	Reißlänge km	15,44	15,12	14,88	13,73	13,89	13,31
	Änderung %	± 0	-2,10	-3,63	-11,06	-10,03	-13,77
	Dehnung mm	76,3	76,7	75,0	71,0	71,9	63,2
	Änderung %	± 0	+0,6	-1,6	-7,0	-5,7	-14,5
Phrix $N_m = 35,4$	Reißlänge km	13,72	13,18	12,56	12,03	11,01	10,06
	Änderung %	± 0	-3,93	-8,52	-12,32	-19,80	-26,73
	Dehnung mm	54,5	55,2	52,3	53,7	50,2	43,3
	Änderung %	± 0	+1,0	-4,0	+1,5	-7,5	-20,5

Die Festigkeits- und Dehnungsänderungen sind für diese Garne erheblich geringer als für Baumwolle, d. h. die Zellwolle besitzt nach diesen allerdings kurzzeitigen Versuchen eine höhere Wärmebeständigkeit als Baumwolle. Eigene ausgedehnte Alterungsversuche, die dem Vergleich zwischen Zell- und Baumwollisolation dienen sollten, wurden an ungetränkten Dynamodrähten von 1 mm Durchmesser vorgenommen; diese Drähte waren mit zweimal Zellwolle — ZZ — und zweimal Baumwolle — BB — umspinnen. Der Auftrag beider Drahtsorten war nahezu der gleiche. Zwecks Alterung wurde eine größere Anzahl von Probestücken dieser Drähte in Öfen verschiedener Temperatur, die jeweils möglichst genau einreguliert und konstant gehalten wurde, eingesetzt und dann je nach Ofentemperatur mehr

<sup>1)</sup> Nach Angabe von Prof. Dr.-Ing. Johannsen, Reutlingen.

oder weniger lang deren Einfluß unterworfen. Auf einem Schabewerk, bestehend im wesentlichen aus einem rotierenden Käfig, der aus sechs hochglanzpolierten, hartverchromten Rundstäben von 10 mm Durchmesser gebildet wird, erfolgte dann die Messung auf Schabefestigkeit der gealterten Drähte, die in Umdrehungen der Trommel ermittelt wurde. Auf diese Weise konnten noch sehr geringe Werte der Schabefestigkeit des ungealterten Zustandes einwandfrei festgestellt werden. Das Ergebnis dieser Untersuchungen veranschaulicht Abb. 26. In

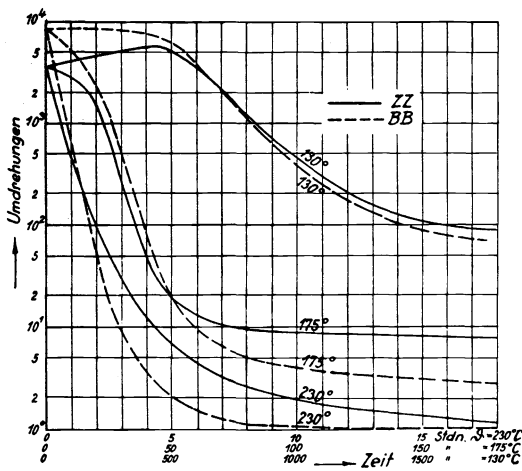


Abb. 26.

Abhängigkeit von der Zeit sind die Schabefestigkeiten, gemessen an Umdrehungen des Schabewerkes für die untersuchten Zell- und Baumwolldrähte, aufgetragen. Die zu den einzelnen Kurven gehörigen Zeitmaßstäbe sind durch die gleichen Temperaturwerte 230°, 175° und 130° C gekennzeichnet.

Im ungealterten oder wenig gealterten Zustande zeigt die Baumwolle erheblich höhere Schabefestigkeit. Bei allen Temperaturwerten aber ist bei stärkerer Alterung auch absolut genommen trotz des geringen Anfangswertes die Schabefestigkeit der Zellwolle höher als die der Baumwolle. Wie aus eigenen Versuchen festgestellt werden konnte, betragen aber die Werte der physikalischen Eigenschaften, z. B. Dehnung, Schabefestigkeit, Durchschlagsspannung, bei der

Zerstörung der Maschine nur noch Bruchteile der Werte dieser Eigenschaften vor der Alterung. Aus diesen Versuchen ergibt sich also, daß man der Zellwolle gegenüber der Baumwolle zumindest keine geringere Alterungsbeständigkeit zuerkennen sollte. Vielmehr wäre nach den Versuchen der Abb. 26 die Zellwolle sogar als wärmebeständiger anzusehen. Wenn andere Untersuchungen in der Praxis gegenteilige Resultate erzielt haben, so dürfte dies auf die mannigfaltigen Unterschiede in den Kunstfasern und deren rasche Entwicklung während der letzten Zeit zurückzuführen sein.

4. Synthetische Fasern. In den letzten Jahren gelang es, im Zuge der Entwicklung der Polymerisationsprodukte, diese in Faserform zu bringen. Als Ausgangsstoffe für eine Reihe dieser Erzeugnisse dienen Kohle und Kalk; daher spricht man von Fasern aus „Kohle und Kalk“. In letzter Zeit wurde eine derartige Faser der I. G. unter dem Namen „Vistra Pe Ce“ in den Handel gebracht. Nach Angabe des Herstellers besitzen diese Fasern eine Reihe von Vorteilen gegenüber den Kunstfasern auf Cellulosebasis, so z. B. völlige Wasserunempfindlichkeit, große Naßfestigkeit, hohe Elastizität, Beständigkeit gegen aggressive Chemikalien wie Säuren und Alkalien. Ferner sind diese Fasern verrottungsfest und nicht entflammbar; der elektrische Isolationswiderstand liegt sehr hoch, allerdings auch der Wärmewiderstand. Trotz aller guten Eigenschaften kommen die Pe-Ce-Fasern für den Elektromaschinenbau wegen ihrer thermoplastischen Eigenschaft — Erweichung bei 80° C — nicht in Betracht. In jüngster Zeit wurde eine verbesserte Faser unter dem Namen „Perluran“ bekannt mit erheblich höherer Wärmebeständigkeit und den übrigen guten Eigenschaften der Pe-Ce-Faser; eine ähnliche Faser „Nylon“ ist in Amerika seit kurzem herausgebracht worden.

Die Frage der wärmebeständigen, synthetischen Spinnstoffe steht noch zu sehr in ihrem Anfangsstadium, um weitere Angaben machen zu können.

Es ist zu erwarten, daß auf Grund der raschen Entwicklung der Kunststoffe sich auf dem Gebiete der synthetischen Spinnfasern gleichfalls noch eine Reihe von brauchbaren Neuerungen ergeben werden, die sich dann auch Eingang in den Elektromaschinenbau

verschaffen dürften. Gerade die große Möglichkeit, die Eigenschaften der Kunststoffe und damit der synthetischen Fasern bei ihrer Herstellung weitgehend zu beeinflussen, dürfte in Zukunft noch manche wertvolle Überraschung auf diesem Gebiet moderner Chemie bringen.

#### d) Folien

Verschiedene Kunstharze, Cellulose und Celluloseverbindungen können, wie erwähnt, in Form von äußerst dünnen —  $\delta \geq 20 \mu$  — Folien hergestellt werden. Meist werden diese Folien in endlosen Bändern gegossen und entsprechend der verlangten Breite zugeschnitten. Für die Zwecke des Elektromaschinenbaues, der bei verhältnismäßig hohen Temperaturen noch bestimmte mechanische Festigkeiten der verwendeten Isolierstoffe verlangt, sind die aus Kunstharz hergestellten Folien nicht brauchbar, da sie thermoplastisch sind, bei 80 bis 90° C ihre Festigkeit verlieren und weich werden. Diese aus Polyvinyl und Polystyrolen hergestellten Folien haben sich bei der Kabel- und Kondensatorfabrikation gut bewährt.

Die auf Cellulosebasis hergestellten Folien zeigen größere Wärmebeständigkeit als die Kunstharzfolien, haben aber meist eine hohe Wasserempfindlichkeit oder sind, wie alle Celluloseerzeugnisse, hygroskopisch.

Dagegen zeigen die von verschiedenen Firmen (auf Grund längerer Entwicklungsarbeiten) herausgebrachten Triacetatcellulose-Folien auch für den Elektromaschinenbau brauchbare Eigenschaften und sind, wie übrigens auch die Kunstharzfolien, aus rein deutschen Rohstoffen hergestellt. Zur Erhöhung der Dehnung und Falzzahlen setzt man ihnen einen sogenannten Weichmacher oder ein Gleitmittel zu, das bei höheren Temperaturen entweicht; dabei tritt ein schädlicher Einfluß auf die Wicklung nicht auf, da bei fertig gewickelten Maschinen die bei der Folie vorhandene Dehnung nicht mehr erforderlich ist. Einige physikalische Eigenschaften sind in der folgenden Tafel VI angegeben [18].

Die Wirkung des Gleitmittels drückt sich in einer erheblichen Erhöhung der Doppelfalzzahl und der Bruchdehnung aus; damit steigt die Verarbeitbarkeit der Folien, besonders da es noch gelungen

Tafel VI.

Eigenschaften von Cellulose-Triacetatfolien mit und ohne Gleitmittel

		Zellulose-Triacetatfolie	
		mit rd. 15% Gleitmittel	ohne Gleitmittel
Filmdicke,	mm,	0,04	0,04
Zugfestigkeit	kg/mm <sup>2</sup>	10	10
Bruchdehnung	%	25	8
Doppelfalzzahl		3500....4000	400....500
Gewichtszunahme in Luft (60% rel. Feuchtigkeit)	%	0,3	0,5
Durchschlagfestigkeit	kV/mm	145	150
Dielektrische Verluste % (50Hz)			
lufttrocken	{ 20°C 40°C 60°C 80°C	0,8 0,6 0,7 1,5	0,8 0,6 0,8 1,2
Dielektrizitätskonstante			
	20°C	3,5	2,8
	40°C	3,5	2,4
	60°C	3,5	2,6
	80°C	3,5	2,8

ist, die Kantfestigkeit der geschnittenen Folien, also den Einreißwiderstand zu verbessern. Ferner haben neuere Messungen ergeben, daß die Querfestigkeit der Folien ihrer Längsfestigkeit nicht nachsteht. Die schädlichen Einflüsse des Weichmachers bei der Alterung auf die chemische Stabilität der Cellulose-triacetatfolien können durch geeigneten Stabilisator verhindert werden. Zu ergänzen ist noch, daß Alterungsversuche bei 120° C 14 Tage lang ausreichende Beständigkeit der Cellulose-triacetate ergaben, so daß nach Angaben von Nowak deren Verwendung bei dauernder Temperatur von 110° C ohne Bedenken erfolgen kann [18]. Im Elektromaschinenbau wird Cellulose-triacetat in Band- und Fadenform verwendet.

### e) Anorganische Stoffe

1. Glas. In Form von Glaswolle sind Glaserzeugnisse für Wärmeisolation seit langem bekannt. Auch in der Hochspannungstechnik spielt Glas als Isolator eine bedeutende und bewährte Rolle. Die in jüngster Zeit im Handel auftauchende Glasseide besteht aus Elementarglasfasern von äußerst geringem Durchmesser; je geringer

der Faserdurchmesser gezogen werden kann, um so größer wird die Dehnung und Biegefähigkeit des an und für sich sehr spröden Glases.

Als Ausgangsrohstoff für die Erzeugung von Glasfasern dient möglichst alkalifreies Glas; Alkalien begünstigen die Bildung der Oberflächenwasserhäute, auf deren Einfluß die hydrolytische Zersetzung und die erhebliche Verringerung des Isolationswiderstandes der Glasfasern zurückzuführen ist. Die Festigkeitsgrenze von alkalifreiem Glas liegt bei  $800^{\circ}\text{C}$ .

Glasfasern werden in zwei Arten, und zwar als Stapelfasern und als endlose Fasern hergestellt.

Die Stapelfasern gleichen in ihrem Äußeren Woll- oder Baumwollfasern und haben eine Länge von 10 bis 40 cm. Die Länge der end-

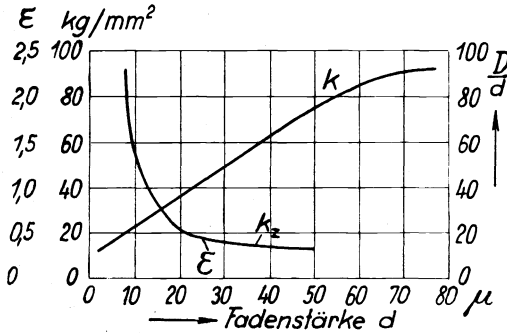


Abb. 27. Zugfestigkeit  $K_z$ , Dehnung  $\epsilon$  und Knotbarkeit  $K$  von Glasfasern in Abhängigkeit von der Faserstärke  $d$  in  $\mu$ .

losen Fasern ist nur durch den Spulenumfang begrenzt, auf die die Fasern bei der Erzeugung aufgewickelt werden. In der Stapelfasermaschine läuft flüssiges Glas in vielen dünnen Fäden durch feine Düsen im Boden eines elektrischen Widerstandsofens, wird dann von einem Dampfstrahl mit hoher Geschwindigkeit auf ein Förderband geblasen und von dort zwecks Aufspulung zur Wickelmaschine transportiert.

Bei der Herstellung der endlosen Fasern können bis über 100 Fasern gleichzeitig durch die Düsen des Widerstandsofens gezogen werden, die dann auf einer rasch drehenden Trommel angeklebt und aufgespult werden. Die Weiterverwendung der aufgespulten Glasfäden

geschieht genau wie bei anderen Textilgarnen. Die Produktionsfähigkeit der Stapelfasermaschine ist erheblich höher als die der Maschine für endlose Fasern.

Die Durchmesser  $d$  der Elementarfasern dürfen nur Werte von einigen  $\mu$  aufweisen. Gute Stapelfasern erreichen  $d = 6 \mu$ ; endlose Fasern können bis auf  $d = 4 \mu$  ausgezogen werden. Abb. 27 zeigt, daß die Dehnung  $\varepsilon$  mit Faserstärken  $d \leq 10 \mu$  erheblich zunimmt; entsprechend verbessert sich auch die Knotbarkeit  $K - D =$  Schlingendurchmesser —, die als Maß der Biegefähigkeit anzusehen ist; gerade diese Eigenschaften sind für die Verspinnung der Fasern zu Fäden und Garnen sehr wichtig. Daß die Zugfestigkeit  $K_z$  — höher als Stahl — für  $d \leq 10 \mu$  — ebenfalls erheblich ansteigt, ist eine weitere gute Eigenschaft der Glasfasern [19]. Diese Verhältnisse zeigen, daß weitere Verbesserungen wichtiger mechanischer Eigenschaften durch Herabsetzen der Faserdurchmesser möglich sind.

Gegenüber den organischen Faserstoffen weisen die anorganischen Glasfasern wesentliche Vorteile auf:

1. sie sind hochwärmebeständig und nicht brennbar. Die Temperatur wird nur durch verwendete Tränkmittel begrenzt;
2. sie sind unempfindlich gegen Säuren, Öle und Dämpfe;
3. sie sind nicht hygroskopisch. Die Fasern können dagegen an der Oberfläche dünne Wasserschichten festhalten; auch kann durch Kapillarerscheinungen in den Hohlräumen zwischen den einzelnen Fasern Feuchtigkeit zurückgehalten werden. Dies wird besonders dann auftreten, wenn der Imprägnierlack nicht fest auf der Oberfläche der Fasern haftet.
4. Die Wärmeleitfähigkeit ist besser als bei den organischen Faserstoffen.

In der amerikanischen Fachliteratur sind eine Reihe von Aufsätzen über Glasisolation mit zahlreichen Vergleichsmessungen zwischen Glas und anderen Isolierstoffen wie Asbest und Baumwolle veröffentlicht worden, die wegen der Bedeutung der Glasfaser als „neuer“ Isolierstoff zur Gegenüberstellung der Eigenschaften von Glasfäden und anderen „alten“ Isolierstoffen im folgenden in größerem Umfange herangezogen werden sollen [19].

An mechanischen Eigenschaften interessiert zunächst die Zugfestigkeit, über die Tafel VII Aufschluß gibt; Werte, gemessen bei Raumtemperatur und Bändern der Querschnittsabmessungen  $25 \cdot 0,25 \text{ mm}^2$ ; Glasfäden — endlose Faser —, weisen die bei weitem größte Zugfestigkeit auf. Weitere interessierende Eigenschaften sind Biege-, Schlag- und Schabefestigkeit.

Tafel VII.

Mechanische Festigkeitseigenschaften von Glas-, Asbest- und Baumwollbändern

Faserstoff	Zugfestigkeit in %	Biegefestigkeit Anzahl Biegungen in %	Schlagfestigkeit Schlagzahlen in %		Schabefestigkeit Umdrehungen in %	
			ungeköhlt	geköhlt	ungeköhlt	geköhlt
endlose Glasfaser	585	—	476	18300	0,61	27,6
Stapel- faser	238	129	103	6300	0,265	14,6
Asbest	238	—	95	1730	11,4	69,8
Baumwolle	100	100	100	100	100	100
Bemer- kungen	100% = 38,5 kg	2100 Biegungen	130 Schläge	75 Schläge	19700 Umdreh.	41500 Umdr.
Bänd- erab- messungen	$25 \times 0,25$ mm <sup>2</sup>	$25 \times 0,25$ mm <sup>2</sup>	$25 \times 0,38$ mm <sup>2</sup>	$25 \times 0,38$ mm <sup>2</sup>	$25 \times 0,25$ mm <sup>2</sup>	$25 \times 0,25$ mm <sup>2</sup>

Die Messungen sind bei Raumtemperatur ohne Vorbehandlung durchgeführt. Die Dicken der Bänder sind zum Teil verschieden. Alle Werte sind auf Baumwolle = 100% umgerechnet, wobei der Unterschied in der Bandstärke linear berücksichtigt ist. Die Biegefestigkeit wurde in einer besonderen Vorrichtung, die gleichmäßige Beanspruchung aller Fasern gewährleistete, geprüft; gezählt wurden die Hin- und Hergänge. In einem Hammerwerk wurde die Schlagfestigkeit durch die Schlagzahl bestimmt. Ein Hammer von 2,3 kg fiel aus 15 cm Höhe auf das Prüfband, das mit 1,8 kg über einen Radius von 4,8 mm gespannt war. Schließlich wurde die Schabe- oder Scheuerfestigkeit mittels rotierender Stahlplatte von  $51 \cdot 6,35 \text{ mm}^2$  Querschnitt, die mit 75 U/min lief, in Anzahl der Umdrehungen gemessen, wobei die Bänder mit 0,91 kg belastet waren.

Die Prüfung der Biege-, Schlag- und Schabefestigkeit ist für Faserisolerstoffe auch in den amerikanischen Vorschriften nicht vorgesehen. Die Prüfapparaturen mögen zum Teil unvollkommen sein. Immerhin spielen diese Eigenschaften insbesondere beim



Wickeln von Maschinen, wie früher ausgeführt, eine gewisse Rolle. Gegenüber Baumwolle, deren gute Verarbeitungseigenschaften wohl bekannt und unbestritten sind, ist nach vorstehenden Messungen Glasseide nur in der Schabefestigkeit in ungetränktem Zustande wesentlich unterlegen, hingegen in Zug- und Schlagfestigkeit um vieles überlegen. Die Biegefähigkeit ist fast die gleiche. Die starke Erhöhung der Schlag- und Schabezahlen durch die Tränkung braucht nicht zu verwundern, da bei diesen Prüfungen im wesentlichen der

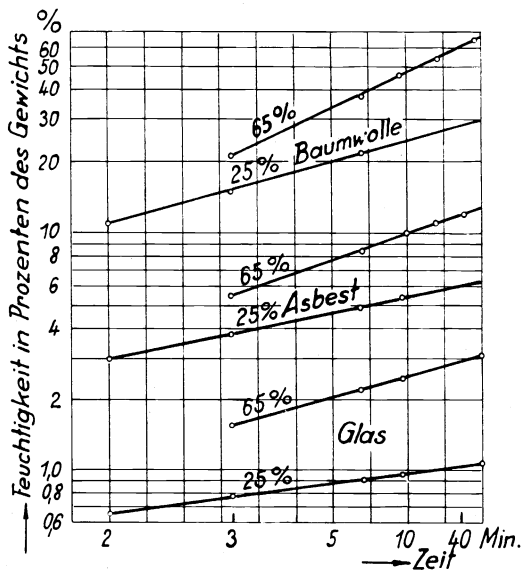


Abb. 28. Feuchtigkeitsaufnahme von Glas, Asbest und Baumwolle in Abhängigkeit von der Zeit in Minuten bei 25 und 65% relativer Luftfeuchtigkeit  $\epsilon$ .

Lack und nicht der Träger beansprucht wird. Die geringere Schabe- oder Scheuerfestigkeit der Glasseide ist für die Praxis ohne große Bedeutung, da z. B. nach eigenen Messungen die Scheuerfestigkeit von Lackdrähten noch kleiner als die von Glasseide — getränkt — ist und dort für die Verarbeitung von Wicklungen ausreicht. Da die Glasfäden ungeklebt auf dem Draht selbst bei doppelter Umspinnung leicht verrutschen, wird in der Regel der Draht nach der Umspinnung getränkt.

Über das Verhalten bei Feuchtigkeit geben die beiden Abb. 28 und 29 Aufschluß. Die Feuchtigkeitszunahme in Gewichtshundertteilen von Glas in Abhängigkeit von der Zeit (Minuten) bei 25 und 65 % relativer Luftfeuchtigkeit und 25° C Raumtemperatur, ist um eine 10. Potenz niedriger als die bei Baumwolle, niedriger auch als bei Asbest; dabei waren alle Bänder ungetränkt und als Vor-

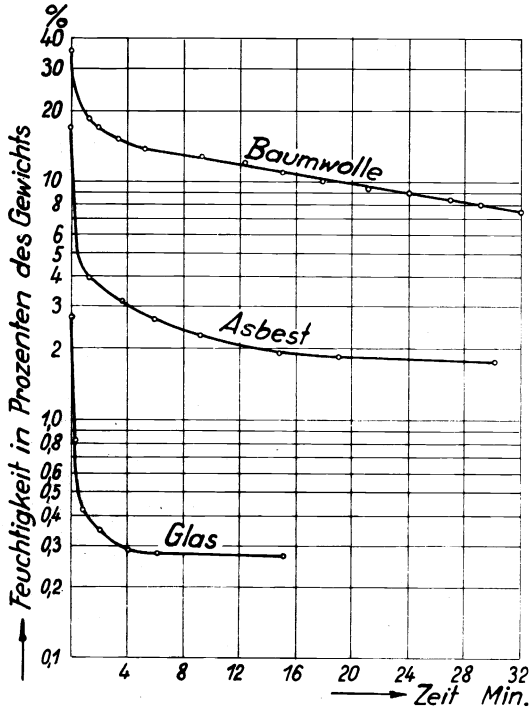


Abb. 29. Feuchtigkeitsabnahme von ungetränkten Glas-, Asbest- und Baumwollbändern in Abhängigkeit von der Zeit in Minuten.

behandlung 16 Stunden bei 150° C getrocknet. Die Feuchtigkeitsabnahme bei Glas geht (Abb. 29) bedeutend schneller als bei Baumwolle und Asbest vor sich und ist prozentual, bezogen auf den Anfangszustand, auch stärker. Die Versuchsbedingungen waren folgende: Alle Bänder ungetränkt, Lagerung bei 40° C und 100 % relativer Feuchtigkeit bis zum Feuchtigkeitsgleichgewicht, dann Messung bei 25° C und 50 % relativer Feuchtigkeit.

Den Vergleich der Spannungsfestigkeit für Glas-, Baumwoll- und Asbestband von  $25 \cdot 0,25 \text{ mm}^2$  bringt folgende Tafel VIII, die Messungen der Electric Coil Company, Bluefield, Ohio, USA., entstammt.

Tafel VIII.

Elektrische Festigkeit von Glas-, Asbest- und Baumwollbändern

Faserstoff	Band- abmessungen in $\text{mm}^2$	Durchschlagspannung in $\text{kV/mm}$	
		ungetränkt	getränkt
endlose Faser	$25 \times 0,25$	4,33	52,1
Stapel- faser	$25 \times 0,25$	4,25	43,3
Asbest	$25 \times 0,25$	2,44	42,3
Baumwolle	$25 \times 0,28$	4,48	40,1

Die Durchschlagversuche sind nach der Kurzzeitmethode der amerikanischen Materialprüfungsvorschriften bei  $27^\circ \text{ C}$  ( $80^\circ \text{ F}$ ) und 60% relativer Feuchtigkeit vorgenommen. Ungetränkt liegt Glas in der Höhe von Baumwolle; Asbest ist bedeutend schlechter; getränkt haben alle drei Stoffe nahezu gleiche Werte, da bei getränkten Faserstoffbändern nicht der Lackträger, sondern das Tränkmittel, also der Lack die elektrische Festigkeit abgibt. Die kleinen Unterschiede der Spannungsfestigkeit bei den getränkten Bändern sind wohl auf die Streuung der Meßwerte zurückzuführen.

Die nächste Tafel IX zeigt die elektrische Durchschlagfeldstärke in  $\text{kV/mm}$  für Baumwoll- und Glasgewebe von 0,25 mm Dicke in Kurzzeitprobe — 2 Stunden — bei verschiedenen Temperaturen: Raum-,  $121^\circ \text{ C}$  ( $250^\circ \text{ F}$ ),  $177^\circ \text{ C}$  ( $350^\circ \text{ F}$ ),  $232^\circ \text{ C}$  ( $450^\circ \text{ F}$ ) vor und nach der mechanischen Beanspruchung des Knitterns. Die Elektroden saßen dabei auf der Knitterstelle. Zu weiteren Variation wurde noch durchsichtiger und undurchsichtiger Lack, hier bezeichnet als heller und dunkler, verwendet. Die angegebenen Zahlen sind Mittelwerte. Die Spannungsfestigkeit steigt mit der Temperatur infolge der kurzen Einwirkdauer (Lackaushärtung?) beim hellen Lack an; bei dunklem Lack zeigt das Baumwollbatistband schon bei 2 Stun-

Tafel IX.

Elektrische Festigkeit in kV/mm von getränkten Baumwoll- und Glasbändern nach kurzzeitiger Alterung vor und nach Knitterbeanspruchung

1	2	3				4			
2	Temperatur	unbeansprucht				geknittert			
		Heller Lack		Dunkler Lack		Heller Lack		Dunkler Lack	
		B-wolle	Glas	B-wolle	Glas	B-wolle	Glas	B-wolle	Glas
3	Raum	35,8	39,7	50,5	51,2	23,2	22,2	20,2	34,2
4	121°(250F)	38,3	44,5	53,2	53,0	16,4	20,7	20,7	36,2
5	177(350F)	38,3	50,2	47,6	53,5	15,7	26,4	4,75	18,1
6	232(450F)	41,6	58,0	43,1	54,5	17,2	26,0	4,74	15,6

den Einwirkung ein Nachlassen der Spannungsfestigkeit bei höheren Temperaturen. Durch das Knittern sinkt die Durchschlagspannung erheblich selbst bei Raumtemperatur ab. Die Einwirkung der Temperatur zeigt sich besonders stark bei Baumwolle und schwarzem Lack; die Baumwolle hat bei 177 und 232° C schon erheblich an Biegefähigkeit verloren, hat Risse beim Knittern erhalten, so daß Spalten im Träger entstanden sein müssen, durch die die elektrische Festigkeit auf  $\frac{1}{4}$  des Ausgangswertes herabgesetzt wird. Der helle Lack ist bei weitem temperaturfester. Sogar geknittert zeigt sich noch ein Ansteigen der Spannungswerte, ein Beweis, daß die Glasfäden durch die Temperatur nicht angegriffen worden sind.

Die folgenden Abb. 30, 31, 32 behandeln das Verhalten des Isolationswiderstandes, gemessen in M $\Omega$  bei Feuchtigkeitseinwirkung. In Rücksicht auf die große Oberfläche von Glasgespinnst je Gewichtseinheit wird man besser von Oberflächenwiderstand sprechen. In Abhängigkeit von der relativen Feuchtigkeit in % zeigt Abb. 30 die Abnahme des Isolationswiderstandes für Glas-, Stapel- und endlose Faser, Baumwolle und Asbest; die geprüften Bänder mit den Abmessungen 25,4 · 0,38 mm<sup>2</sup> waren zunächst ungetränkt, dann zweimal in Glyptallack Nr. 2464 getränkt. Die Proben wurden je 72 Stunden bei 37° C und relativen Feuchtigkeitsstufen von 90, 74 und 47 % ausgesetzt. Glas schneidet bei dieser Probe am besten ab. Die Elektroden hatten 25,4 mm Kantenlänge. Abb. 31 zeigt den Isolationswiderstand für Glas- und Baumwollbänder-

Probestücke von  $25 \cdot 25 \cdot 0,25 \text{ mm}^3$  bei 90% relativer Feuchtigkeit in Abhängigkeit von der Zeit — maximal 30 Tage —, und zwar Kurve: Glas *a* und Baumwolle mit schwarzem Lack getränkt und vor der Messung 2 Stunden bei  $177^\circ \text{C}$  getrocknet; Kurve: Glas *b* gilt für Glasband mit wasserlöslichem Bakelitlack getränkt. Als Elektroden wurden zwei abgeschirmte Messingklammern in 5 cm Abstand benutzt. Eine weitere Messung des Isolationswiderstandes

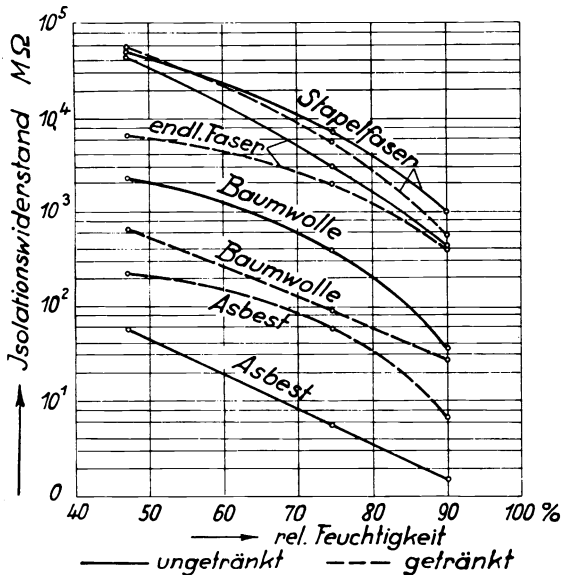


Abb. 30. Isolationswiderstand in  $M\Omega$  von getränkten und ungetränkten Bändern aus Glas-, Stapel- und endloser Faser, Asbest und Baumwolle in Abhängigkeit von der relativen Luftfeuchtigkeit.

in Abhängigkeit von der Zeit in Tagen an fertigen, getränkten Spulen mit Glas- und Asbestisolation zeigt Abb. 32. Eine Veränderung im Tränklack bringt eine Erhöhung der Widerstandswerte um eine Größenordnung, da ja der Tränklack das lackierte Band in seinen elektrischen Eigenschaften naturgemäß stark beeinflusst.

Die Wärmebeständigkeit oder Alterungsfestigkeit, ausgedrückt durch die Veränderung mechanischer Eigenschaften in Abhängigkeit von der Einwirkdauer bestimmter Temperaturen, behandelt die

folgende Abb. 33. Die Abnahme der Zugfestigkeit in Abhängigkeit von der Alterung wird von vielen Autoren als Kriterium für die Wärmebeständigkeit von Isolierstoffen herangezogen. In Abb. 33 ist die Zugfestigkeit von Glas — endlose und Stapelfaser —, Baumwolle und Asbest, gemessen in Abhängigkeit von der Temperatur, aufgetragen; dabei wurde die Festigkeit der einzelnen Bänder un-

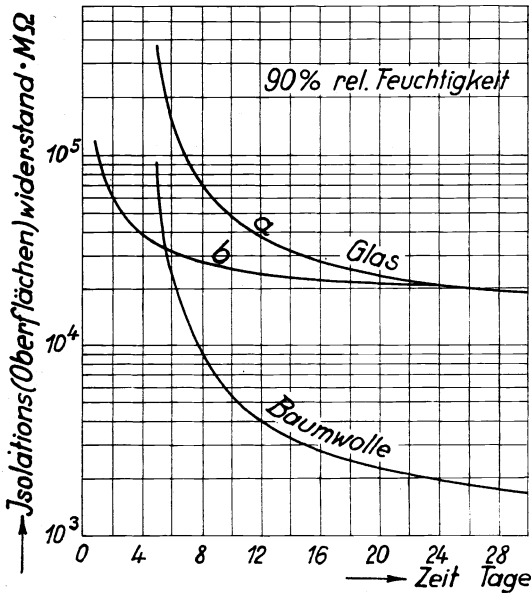


Abb. 31. Isolationswiderstand in  $M\Omega$  von Glas- und Baumwollbändern bei 90 % relativer Luftfeuchtigkeit in Abhängigkeit von der Zeit.

gealtert zur Erleichterung des Vergleichs = 100 % gesetzt. Jeder Meßpunkt stellt den Mittelwert aus fünf Einzelmessungen dar. Die Bänder, die einheitlich  $25 \cdot 0,25 \text{ mm}^2$  im Querschnitt hatten, wurden mindestens 24 Stunden in einem elektrischen Ofen der Versuchstemperatur unterworfen. Zwischen 318 und 538° C wurden keine Meßwerte aufgenommen.

Die Anfangswerte der Kurven, d. h. die Zugfestigkeit ungealtert, sind bezogen auf diesen Wert für endlose Faser = 100 % — für Stapelfaser 40,5 %, für Baumwolle 18 % und für Asbest 4,5 %. In diesen

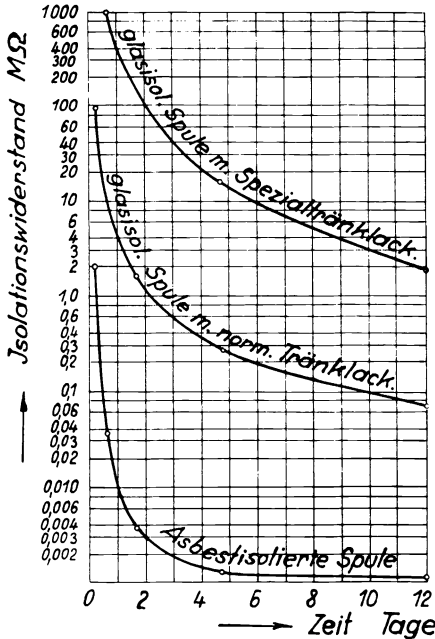


Abb. 32. Isolationswiderstand in MΩ von glas- und asbestisolierten Spulen in Abhängigkeit von der Zeit in Tagen.

Verhältniszahlen kommt die große Zugfestigkeit der endlosen Glasfaser deutlich zum Ausdruck. Bis ungefähr 200° C steigt die Zugfestigkeit der Glasbänder aus noch nicht geklärten Gründen sogar etwas an und zeigt bei 250° C immer noch die Festigkeit des ungealterten Zustandes. Die Glasseide hat noch keine Einbuße an Zugfestigkeit erlitten für Temperaturen, bei denen die organische Baumwolle verkohlt ist und damit jegliche Zugfestigkeit verloren hat. Selbst das anorganische Asbest zerfällt, während die Glasfasern noch 40% ihrer

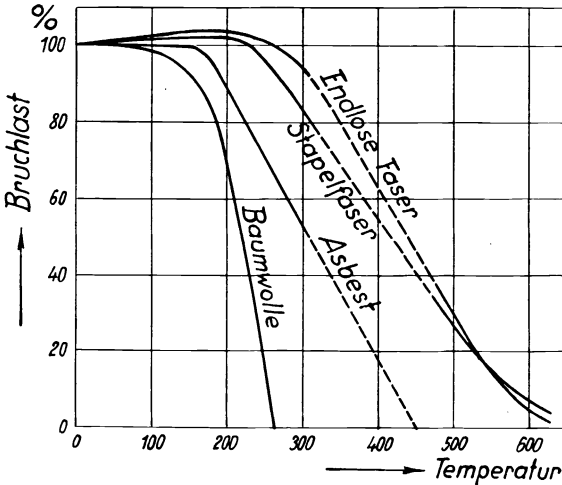


Abb. 33. Bruchlast in Abhängigkeit von der Alterung für Glas-, endlose und Stapelfaser, Asbest- und Baumwolle.

Anfangsfestigkeit aufweisen. Die Einzelwerte sind Mittelwerte aus einer Reihe von einzelnen Messungen, bei denen die Bänder, wie erwähnt, mindestens 24 Stunden lang der betreffenden Temperatur ausgesetzt wurden. Die größten Abweichungen vom Mittelwert betragen  $-20,5\%$  und  $+10,5\%$ . Aus in Amerika häufig angewandten sogenannten Kurzversuchen: 5 Minuten mit  $300^{\circ}\text{C}$  ergaben sich nach Atkinson folgende Festigkeitszahlen:

Endlose Glasfaser .....	87 bis 92 %	} des Anfangs- wertes
Stapelglasfaser .....	85 bis 95 %	
Baumwollfaser .....	—	
Asbestfaser .....	46 %	

Tafel X.

Biegezahlen von getränkten Baumwoll- und Glasbändern vor und nach Alterung

Alterung		Baumwolle	Glas
Temp. $^{\circ}\text{C}$	Zeit Stunden		
Raum	—	100	129
138	24	572	3440
177	2	214	3820
Bemerkungen:		100% = 2400 Biegungen, Band: 25×0,25 mm mit hellem Lack imprägniert.	

Ähnliche Verhältnisse ergaben Proben auf Biegefestigkeit nach Altersbeanspruchung — Tafel X —. Getränktes Baumwollband läßt bei Alterung mit  $177^{\circ}\text{C}$  während 2 Stunden schon erheblich in der Biegefestigkeit nach, während Glasseide sogar noch höhere Werte zeigt als nach einer Beanspruchung von  $120^{\circ}\text{C}$  während 24 Stunden Einwirkdauer. In Abhängigkeit von der Schlagarbeit ist in Abb. 34 die Spannungsfestigkeit vor und nach der Alterung mit  $170$  bis  $180^{\circ}\text{C}$  während eines Monats für Spulen, die in



verschiedener Isolation gewickelt waren, aufgetragen. Diese Beanspruchung tritt auf bei der Montage, z. B. von Polspulen bei kleinen Wickelräumen; diese werden dann meist durch Schlagen mit geeignetem Werkzeug in die vorgesehene Lage gebracht. Über die Messung selbst liegen allerdings keine Angaben vor. Immerhin zeigt sich auch hier Glas den anderen Isolationen Baumwolle und auch Asbest überlegen.

Nach eigenen Alterungsmessungen an Isolierstoffen, z. B. Lack und organischen Textilfasern, ergeben die amerikanischen Kurzzeitversuche kein klares Bild über das Verhalten insbesondere von getränkten Isolierstoffen bei den heute üblichen niedrigeren Grenztemperaturen von etwa 100–130° C. Da der Lack bei getränkten Faserstoffen im wesentlichen den Isolierstoff repräsentiert, der Träger dagegen, ob organisch oder anorganisch, zu den Isolationseigenschaften nur wenig beitragen kann,

tritt bei Isolierstoffen, die aus getränkten Faserstoffen bestehen, durch das Tränken eine gewisse Egalisierung von elektrischen und mechanischen Eigenschaften der Isolierstoffe ein. Alterungsversuche an getränkten Faserstoffen laufen daher zunächst stets auf eine Prüfung des verwendeten Tränklackes hinaus. Da die heute üblichen Tränklacke nahezu ausschließlich organischer Natur sind, interessieren insbesondere auch Alterungstemperaturen von etwa 100–150° C bei Versuchsdauern von Monaten und nicht von Stunden. Das Verhalten des Isolierstoffes bei derartiger Alterungsbeanspruchung ist an möglichst zahlreichen Eigenschaften mechanischer und elektrischer Art festzustellen. Erst derartige Messungen liefern die Grundlage zu einer zutreffenden Beurteilung der einzelnen Isolierstoffe untereinander bei den heute üblichen Grenzerwärmungen.

Zum Abschluß der amerikanischen Vergleichsmessungen sei noch auf den Einfluß der Feuchtigkeit nach der Alterung hingewiesen. Aus

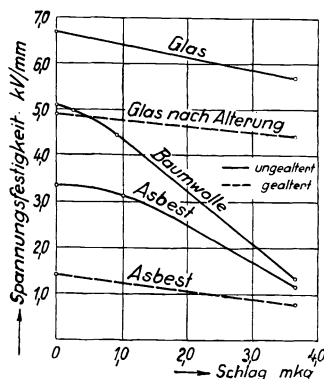


Abb. 34. Spannungsfestigkeit von Spulen in kV/mm isoliert mit Glas, Asbest- und Baumwolle — ungealtert und gealtert — in Abhängigkeit vom Schlag in mkg.

der nachstehenden Tafel XI geht hervor, daß durch Lagerung getränkter Magnetspulen, die mit 170 bis 180° C während eines Monats gealtert sind, in 100% relativer Feuchtigkeit 16 Stunden lang die Spannungsfestigkeit auf  $\frac{1}{3}$  des Wertes vor der Lagerung absinkt;

Tafel XI.

Spannungsfestigkeit in kV/mm getränkter, asbest- und glas-isolierter Drähte bei Alterung und nachfolgender Feuchtigkeitseinwirkung

Alterung Temp. Zeit	Vorbehandlung			Spannungsfestigkeit kV/mm	
	Prüfung bei °C	Lagerung Zeit	ε%	Asbest	Glas
Raum	—	25	—	50	3,43   7,6
"	—	40	16 h	100	1,17   4,1
170/180 1 Mon.	25	—	50		2,11   5,8
170/180 1 Mon.	40	16 h	100		0,45   1,6

die Ursache hierfür ist aus der Messung nicht zu erkennen. Im übrigen muß man aber in Maschinen stets mit Anwesenheit von Feuchtigkeit, also den kleineren Werten der elektrischen Festigkeit, rechnen.

Wie aus den vorstehenden Vergleichsangaben hervorgeht, kann Glasseide Baumwolle weitgehend ersetzen. Die geringe Schabefestigkeit der Glasfäden läßt sich durch Vermeiden scharfer Kanten, z. B. bei Profildrähten, entsprechend berücksichtigen. Glasgarne werden nach metrischer Nummer gekennzeichnet und sind in der Feinheit von Seidengarnen herzustellen; sie lassen sich wie Textilgarne für Drahtisolation mit Auftrag wie bei Seide verwenden und zu Bändern, Schläuchen usw. in beliebiger Stärke von etwa 0,1 mm ab verarbeiten. Die Tränkung mit Lacken auf verschiedener Rohstoffbasis bietet keine Schwierigkeiten. Verbindungen von Glasgewebe als Träger und Glimmer als Isolator geben Isolierstoffe, die gegenüber den früher erwähnten Glimmererzeugnissen — Glimmer und Träger aus organischen Stoffen auf Cellulosegrundlage — zweifellos durch Verwendung des anorganischen Trägers höhere Wärmebeständigkeit auch über die neu geschaffene Klasse  $B_H$  hinaus aufweisen dürften. Der vollen Ausnutzung der guten thermischen

Eigenschaften der Glasfaser steht zur Zeit noch der unvermeidliche organische Kleb- und Tränklack entgegen, der schließlich auch die Grenztemperatur der Glasisolation und ihrer Kombinationen mit anderen anorganischen Isolierstoffen bestimmt. Es ist aber anzunehmen, daß die Arbeiten der Lackchemiker dem Elektromaschinenbauer in nicht zu ferner Zukunft zu einem brauchbaren, in der Wärmebeständigkeit verbesserten Tränk- und Kleblack verhelfen. Der hohe Preis der Glasgarne dürfte sich durch entsprechende Produktionsvermehrung und -lenkung senken lassen, wobei die besonders thermisch besseren Eigenschaften der Glasisolation eine gewisse Erhöhung des Preises gegenüber Baumwolle sicher rechtfertigen. Die guten Eigenschaften der Glasfasererzeugnisse haben in Amerika zu sehr umfangreicher Verwendung im Elektromaschinenbau, besonders bei thermisch hoch beanspruchten Wicklungen, geführt, wobei bisher beste Erfahrungen gemacht wurden.

2. Eloxal. Es ist schon seit langem vorgeschlagen worden, die Isolationsfähigkeit des Aluminiumoxyds zur Isolierung bei elektrischen Maschinen auszunutzen (ETZ. 1913, S. 1334—36). Einzelne praktische Versuche sind allerdings noch nicht bekanntgeworden. Dagegen werden oxydierte Aluminiumdrähte z. B. für Bremsmagnetwicklungen mit Erfolg verwendet.

Eloxal ist das Produkt der ELEktrolytischen OXYdation des ALuminiums[7]. Eine solche Schicht kann in Stärken von einigen  $\mu$  bis einigen Hundert  $\mu$  auf der Oberfläche von Aluminium gebildet werden. Diese Oxydschicht ist fest mit dem reinen Aluminium verwachsen und ihre Haftfestigkeit so groß, daß sie nur mit scharfen mechanischen Mitteln oder chemisch entfernt werden kann. Auf Grund dieser Bildung und des Isoliervermögens des Aluminiumoxyds muß man annehmen, daß die Schicht porös ist, da sonst ein Stromdurchgang im elektrolytischen Bad und damit ein Wachsen der Schicht unmöglich wäre. Man hat den Porenquerschnitt mit  $10^{-5}$  bis  $10^{-3}$   $\text{cm}^2$  berechnet. Die Verschleißfestigkeit oder Härte, die nach einem Verfahren von Siemens durch einen hin- und hergehenden, stets gleich belasteten Reibstift aus Hartmetall gemessen werden kann, ist abhängig von der Art der Herstellungsverfahren und dem eloxierten Grundmaterial.

Gegenüber den üblichen Isolierstoffen liegt diese Härte sehr hoch, etwa zwischen Quarz- und Topashärte. Die härtesten Schichten sind auch die sprödesten. Beim Hin- und Herbiegen treten daher leicht Risse auf. Dabei blättert aber die Oxydschicht nicht ab. Weiche Schichten, die eine größere Biegefähigkeit besitzen, und daher als Isolierschichten z. B. auf Drähten besser geeignet sind, werden durch Wechselstromeloxierung oder besondere chemische Nachbehandlung erzielt. Der Biegeprobe nach DIN 6450 genügen diese Schichten aber auch noch nicht. Der Schmelzpunkt des Aluminiumoxyds liegt

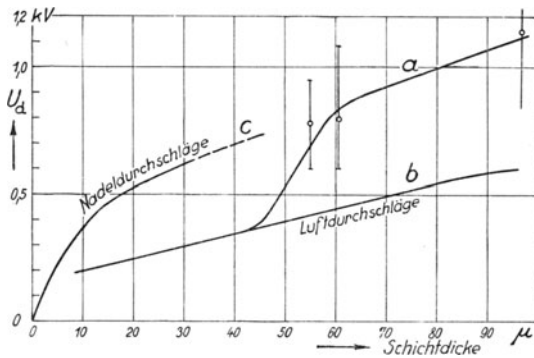


Abb. 35. Durchschlagspannung  $U_d$  von Eloxal in Abhängigkeit von der Isolationschichtdicke in  $\mu$  bei verschiedenen Elektrodenarten.

bei 2000° C. Die thermische Festigkeit eines eloxierten Aluminiumdrahtes ist also hervorragend und lediglich durch das Leitermaterial selbst begrenzt, dessen Schmelzpunkt bei 650° C liegt.

Durch die verschiedene Wärmeausdehnung von Metall und Schicht treten bei hohen Temperaturen Querrisse in der Schicht auf, und zwar um so eher, je dicker und spröder die Schicht ist. Unter 80 bis 100° sind solche Risse nicht festzustellen; die Schicht springt allerdings nicht ab.

Die Messung der Durchschlagfeldstärke an ebenen eloxierten Platten ergab, daß Luftdurchschläge bei etwa 45  $\mu$  Schichtdicke stattfinden, daß also der Durchschlag hierbei immer durch die Poren geht, Abb. 35 [7]. Die Eloxalschicht würde danach dann lediglich dazu dienen, einen der Schichtdicke entsprechenden Abstand zwischen

den Leitern herzustellen. Zwischen 45 und 60  $\mu$  steigt bei flachen Elektroden die Durchschlagspannung — Kurve *a* — stärker als proportional der Schichtdicke bei rissfreien Oberflächen an, so daß hier oberhalb dieser kritischen Schichtstärke die ganze feste Oxydschicht zu durchschlagen ist. Sind dagegen Risse in der Oberfläche der isolierten Platte, so schlägt diese an den Rissen durch — Kurve *b*.

Bei Nadelelektroden erfolgt der Durchschlag durch das Aluminiumoxyd schon von kleinen Isolierschichtstärken an. Man erhält dann für ebene Schichten die in der Abb. 35, Kurve *c*, angegebenen

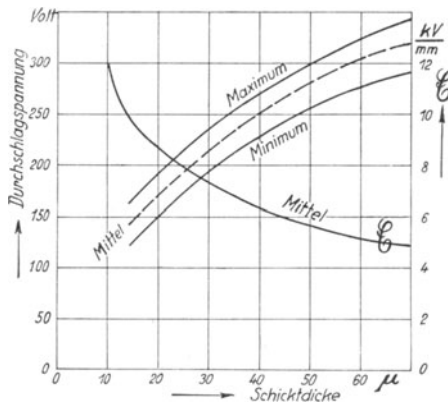


Abb. 36. Durchschlagspannung  $U_d$  und Spannungsfestigkeit  $\epsilon$  in kV/mm für einen eloxierten Runddraht in Abhängigkeit von der Isolationschichtdicke in  $\mu$ .

Werte. Die Streuung der Meßpunkte ist für die besonders interessierende Kurve *a* eingezeichnet. Man sieht, daß, unter der Voraussetzung einer gewissen Sicherheit, man höchstens mit der Spannungsfestigkeit einer der Schichtdicke entsprechenden Luftschicht rechnen kann. Die Durchschlagspannung, gemessen an 1,3 mm starken, eloxierten Drähten, abhängig von der Schichtdicke, zeigt Abb. 36; sie geht in etwa proportional mit der Schichtdicke. Die elektrische Feldstärke ist immerhin beachtenswert und für viele Fälle im Elektromaschinenbau ausreichend. Durch Kapillarwirkung können jedoch die Poren leicht Feuchtigkeit aufnehmen, wodurch die Durchschlagfestigkeit und der Isolationswiderstand stark herabgesetzt werden.

Andererseits ist die porige Struktur wieder günstig, wenn die Oberfläche lackiert werden soll, da hier der Lack leichter haftet. Durch das Eloxieren und anschließende Lackieren mit den heute vorhandenen organischen Tränkmitteln erhält man aber eine ziemlich teure und umständlich herzustellende Isolationsschicht, die gegenüber gewöhnlichen Lackdrähten keine Verbesserung aufweist und vor allem die Vorteile der hohen thermischen Festigkeit der Eloxal-isolation nicht zur Anwendung kommen läßt. In Ausnutzung des Eloxals zu Isolierzwecken im Elektromaschinenbau sind eloxierte Aluminiumdrähte als Leiter und eloxierte Aluminiumfolien als Nutisolation vorgeschlagen worden. Die Anwendung scheint bisher an der geringen Spannungsfestigkeit der Eloxalschichten besonders bei Anwesenheit von Feuchtigkeit gescheitert zu sein.

## V. Ausführung der Isolation elektrischer Maschinen

### a) Allgemeines

Die durch Spannung, Stromart, Umfangsgeschwindigkeit, Grenzerwärmung und andere etwaige Sonderanforderungen bedingten Wicklungs- und Isolationsausführungen interessieren hier weniger; es kommt vielmehr auf den Vergleich der Brauchbarkeit „alter“ und „neuer“ Isolation an, wobei die Frage der zur Zeit einsetzbaren Austausch-Isolierstoffe im Vordergrund stehen soll.

Die Wicklungen elektrischer Maschinen bestehen in der Regel aus einer mehr oder weniger größeren Anzahl von Einzelleitern, die in Bündeln oder Spulenseiten zusammengefaßt werden. Die einzelnen Leiter derartiger Bündel sind meist hintereinandergeschaltet und daher untereinander zu isolieren — Leiterisolation. Die Spannung der einzelnen Spulenseiten gegen das aktive Eisen in den Nuten und gegeneinander in den Wickelköpfen außerhalb des aktiven Eisens zwingt zur besonderen Isolierung jedes Leiterbündels — zur Spulenisolation. Nach dem Einbau der Wicklung bei kleineren Maschinen bzw. der Fertigstellung von Einzelspulen bei größeren Aggregaten wird die Tränkung dieser Teile vorgenommen. Im Zusammenhang mit der Verwendung von Lackdrähten kommt diesem Arbeitsgang gerade bei der Isolierstoffumstellung besondere Bedeutung zu. Kommutator, Schleifring- und Blechisolierung sollen, da hierüber weniger zu berichten ist, zum Schluß nach der Wicklungsisolation kurz erwähnt werden.

### b) Leiterisolation

Im Elektromaschinenbau kommen als Profile der Einzelleiter bzw. -stäbe, soweit die Wicklungen nicht etwa als Kurzschlußläuferkäfige gegossen werden, nur Kreis- und Rechteckquerschnitte entweder massiv oder verdreht — Seil — zur Verwendung. Die Ver-

arbeitung dieser beiden Profile beim Wickeln kann verschieden sein; Rechteckdrähte werden besonders bei Stabwicklungen und größeren massiven Querschnitten blank in bestimmte Formen gebogen und dann erst isoliert. Runddrähte dagegen müssen vielfach in kleinem Radius gewickelt werden, so daß ihre mechanischen Beanspruchungen beim Verarbeiten erheblich größer werden als die der Rechteckdrähte; in der Herstellung und der Art der Isolierung von Einzelleitern bestehen für Rechteck- und Rundprofile kaum Unterschiede. Gewisse Vorsicht erfordern dabei allerdings scharfkantige Flachdrähte.

Die Isolation kann auf die Drähte aufgebracht werden durch:

- |                            |                |
|----------------------------|----------------|
| 1. Bespinnung,             | 4. Umpressung, |
| 2. Beflechtung,            | 5. Lackierung, |
| 3. Bewicklung (Umbandeln), | 6. Eloxierung. |

Zur Bespinnung und Beflechtung eignen sich alle Isolierstoffe, die in Garnform herstellbar sind; also: Seide, Baumwolle, Kunstseide, Zellwolle, Glas und beschränkt Asbest. Je nach verlangter mechanischer und elektrischer Festigkeit wird der Draht einmal oder zweimal besponnen, wobei die zweite Bespinnung im Gegenschlag ausgeführt wird.

Die Beflechtung in Art eines Isolierschlauches haftet fester auf dem Leiter als die Bespinnung, zeigt dafür aber auch stärkeren Auftrag. Für besondere starke mechanische Beanspruchungen kombiniert man Bespinnung und Beflechtung, wobei nach DIN VDE 6436 sogar zweimal Bespinnung und einmal Beflechtung ausgeführt werden kann.

Zur Bewicklung von Dynamodrähten werden Isolierstoffe in schmaler Folienform verwendet, insbesondere also Papier und Triacetate. Bei Flachstäben, die zur Herstellung von Formspulen blank gebogen werden, können natürlich auch Bänder in passender Breite aus anderen Isolierstoffen benutzt werden, soweit diese sich weben oder in Rollen — Glimmererzeugnisse — herstellen lassen. Dabei wird der Stab in seinem ganzen geraden Teil mit dem Isolierstoff in einer Bahn unter Lackzusatz umwickelt, ständig gebügelt und schließlich in die vorgeschriebenen Abmessungen gepreßt. Da die isolierten Runddrähte der Wickelprüfung nach



DIN VDE 6450 genügen sollen, muß die Bewicklung mit Vorspannung aufgebracht und so dicht sein, daß beim Biegen um den Prüfdorn keine Verschiebung der Isolation auftritt und somit der blanke Draht sichtbar wird. Die Bewicklung ist daher schraubenförmig und stark überlappt aufzubringen, so daß als Isolationsauftrag einseitig mindestens mit der doppelten Bandstärke zu rechnen ist. Bei der Bewicklung lassen sich Hohlräume zwischen den einzelnen Gängen der schraubenförmig aufgebrachten Folien nicht vermeiden, die zur Erleichterung der Feuchtigkeitsaufnahme beitragen und bei Hochspannung zum Glimmen führen können.

Nach einem neueren, fabrikationstechnisch sehr interessanten Verfahren werden Drähte mit dünnen Folien hoher Biegefähigkeit ummantelt; die Isolation legt sich dabei durch sinnreiche Führung in ein- oder mehrfacher Umhüllung so um den Draht, daß nur eine Längsnaht entsteht. Zur Haftung auf dem Draht und der einzelnen Lagen aufeinander wird die Isolation mit Kleblack versetzt. Äußerlich gleichen diese Dynamodrähte guten, glatten Lackdrähten, die dank der Färbfähigkeit der Folien in beliebiger Farbe hergestellt werden können. Die Herstellungsgeschwindigkeit beträgt 2000 m/Stunde und höher [ETZ 1940, S. 163].

Schwierigkeiten in der Herstellung eines gleichmäßigen und dichten Auftrages von hinreichend geringer Stärke mit chemisch reinen Asbestgarnen durch Bespinnen oder Beflechten führten zur Ausbildung eines besonderen Verfahrens; ähnlich der Bleimantelumpressung von Kabeln wird hierbei der Leiter durch eine zusammenhängende, eng verfilzte Schicht aus feinst aufgeschlossenen Asbestfasern mit starkem Druck nahtlos ummantelt. Zwecks Feuchtigkeitsschutz wird dann diese Schicht mit flamm sicherem Speziallack getränkt, wozu sich plastische Tränklacke auf Kunstharzbasis mit feinkörnigen Silikaten als Pigmentzusatz eignen sollen [37].

Bei der Lackdrahtherstellung wird der blanke Draht in einem kontinuierlichen Arbeitsvorgang durch ein Lackbad gezogen und anschließend in einem Durchlaufofen gebrannt; dieser Vorgang wiederholt sich bei normalisiertem Draht etwa fünf- bis sechsmal, bei sogenanntem Starkschichtdraht acht- bis zehnmal. Die Auftragsstärke kann durch die Viskosität des Bades und einen Abstreifer

reguliert werden. Die Abzugs- oder Fahrgeschwindigkeit des Drahtes richtet sich nach Drahtstärke, Einbrenntemperatur und Ofenlänge; sie beträgt bei Öllacken, 370° C und 0,5er Draht bei 2,5 m Ofenlänge etwa 5 m je Minute; für Lacke auf Kunstharzbasis liegt sie bis zu 50 % höher bei 250° C Einbrenntemperatur, wobei die blanken Kupferdrähte vorzuglühen sind.

Wie eigene Versuche auf einem Schabewerk an Lackdrähten ergaben, schwankt die Dicke bzw. die Härte der Isolationsschicht solcher Emailedrähte in weiten Grenzen; damit verbunden ist ein erheblicher Unterschied in den mechanischen und elektrischen Eigenschaften. Bedeutend günstigere Werte erhält man nach ausländischen Angaben, durch ein neuartiges Lackierverfahren — Formex. Der blanke Kupferdraht wird dabei durch eine auf dem Lackbad frei schwimmende Düse gezogen; dadurch stellt sich eine viel gleichmäßigere Auftragsdicke ein, so daß nach amerikanischen Angaben eine Verbesserung der mechanischen und elektrischen Eigenschaften erreicht wurde [37]. Die Lackierung von Alu-Drähten mit Kunstharzlacken macht nach neueren Angaben keine Schwierigkeiten.

Mit dem Aufbringen der Isolation nach den bisher behandelten Verfahren war stets eine Zunahme der Außenabmessungen des isolierten Drahtes verknüpft. Bei der Ausnutzung des Isoliervermögens der Oxydschichten bleiben die Außenmaße der Drähte erhalten. Die Isolierschicht wächst nach innen. Bei der Eloxierung von Drähten verwendet man zweckmäßigerweise mehrere meterlange Bäder, um Durchsetzgeschwindigkeit und Leistung in wirtschaftlichen Grenzen zu halten. Bei Drähten mit 1 bis 5 mm Durchmesser kann man ungefähr mit einer Fahrgeschwindigkeit von 2 bis 3 m/Minute je 10  $\mu$  bei Wechselstromweicheloxierung rechnen. Da die Bildung der Eloxalschicht an das Metall Aluminium gebunden ist, muß man auch die Verschlechterung der elektrischen Leitfähigkeit des Aluminiumleiters gegen Kupfer mit in Kauf nehmen, wodurch bei gleichen Wicklungsverlusten größere Nutquerschnitte und bei gleichbleibender magnetischer Eisenbeanspruchung erhöhte Maschinenabmessungen erforderlich würden.

Die schlechtere elektrische Leitfähigkeit des reinen Al-Drahtes läßt sich durch die Verwendung von „Al-Cu-Drähten“ merklich

heben. Bei diesen Drähten wird für die Verwendungszwecke des Elektromaschinenbaues über einen Kupferdraht eine sehr dünne Al-Schicht — mit etwa  $20 \mu$  Minimalstärke einseitig — gewalzt, die dann wie jeder massive Aluminiumdraht eloxiert werden kann. So ergibt sich z. B. für einen Al-Cu-Draht von 1 mm Durchmesser mit  $2 \mu$  Aluminiumschicht und  $25 \mu$  Stärke der Eloxalschicht außen eine resultierende elektrische Leitfähigkeit von rund 50 an Stelle von 56 für massives Kupfer. Die Biegefähigkeit solcher Drähte genügt den Ansprüchen des Elektromaschinenbaues. Allerdings stellt der Preis solcher Drähte noch ein großes Hindernis für ihre Verwendung dar; außerdem lassen sich die Verbindungen dieser Al-Cu-Drähte nur schwierig einwandfrei ausführen, da die Al-Schicht auf Grund ihrer großen Haftung auf dem Kupferkern sich schnell nur durch scharfes Beizen entfernen läßt.

Zur Einsparung devisa-belasteter Rohstoffe kann auch sogenannte gemischte Isolation aufgebracht werden; allerdings kommen dabei Mischgarne — z. B. Baumwolle + Zellwolle — selbst weniger in Betracht, vielmehr werden meistens die einzelnen Isolierstoffe lagenweise verwendet. So kann man z. B. bei einem Draht mit doppelter Faserbespinnung die unterste Lage aus Zellwolle, und die obere aus Baumwolle auftragen, um die bessere Reibfestigkeit der Baumwolle auszunutzen. Genormt sind seit längerer Zeit die Verbindung von Lackschichten mit Baumwolle, Seide und Papierisolation. Außerdem wurden gute Erfahrungen mit Lack-Folienschichten gemacht; bei diesen Drähten benutzt man die vorzüglichen elektrischen Eigenschaften beider Isolierstoffe und schützt den Lack durch die Folien-schicht vor Abrieb und dem Angriff der Tränkmittel. Als Beispiel der Mischgarnverwendung sind besponnene Asbestdrähte zu nennen. Um bei Asbest größere Reißfestigkeit zu erzielen, werden diese, wie erwähnt, mit etwa 8 bis 15 % Baumwolle gemischt. Allerdings verliert ein solcher Draht gegenüber einem Leiter mit reiner Asbestisolation erheblich an Wärmebeständigkeit.

Bei Isolierstoffen, die über genügende elastische Dehnung verfügen, z. B. alle Textilfasern, entstehen bei der Verarbeitung zur Drahtisolation keine Schwierigkeiten, wenn die Garne, Folien oder Bänder unter einer bestimmten Zugvorspannung aufgetragen werden.

Unter dem Einfluß der Dehnkräfte schmiegen sich die Isolierstoffe in ihren Windungen eng um den Leiter und verhindern so das Verutschen der Isolation auf dem Leiter, besonders bei Scheuer- und Biegebeanspruchung. Glasgarne dagegen, die nur über geringe Dehnung, aber große Glätte verfügen, werden zweckmäßigerweise mit einem besonderen, möglichst hitzebeständigen Kleblack auf dem Draht befestigt. Bei der Besspinnung hat sich eine Erwärmung des blanken Drahtes auf 300 bis 400° C als vorteilhaft erwiesen, da der Glasfaden dadurch einer Art Bügelvorgang unterzogen wird,

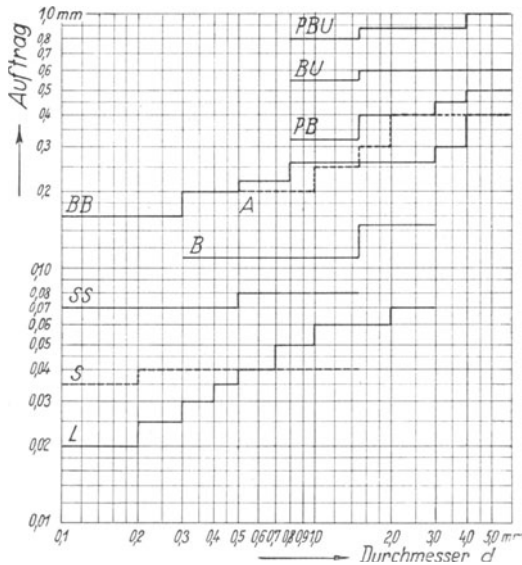


Abb. 37. Isolationszunahme von Dynamdrähten für verschiedene Isolierstoffe, in Abhängigkeit vom Drahtdurchmesser nach DIN VDE 6435.

sich dann leicht in Spiralforn zieht und die zum Kleben notwendige Haftung auf dem Draht von selbst erhält. Als Kleblack kommt am besten härtpbarer Kunstharzlack in Betracht, so daß der fertig geklebte Glasseidendraht einem Brennprozeß unterworfen werden kann, wobei dann eine Art Emaillelack-Glasisolation entsteht.

Bei Profilstäben sind scharfe Kanten möglichst zu vermeiden, da sich an diesen die Isolierstoffe, insbesondere Glasfäden, Folien,

Papier usw., leicht durchscheuern; auch Lacke haften schlecht an derartigen Kanten und zeigen bei der Biegeprobe ebenso wie Eloxalschichten sehr schnell Risse; unter Umständen wird man die Kanten bis zur halbkreisförmigen Abrundung der Schmalseite von Flachstäben brechen müssen.

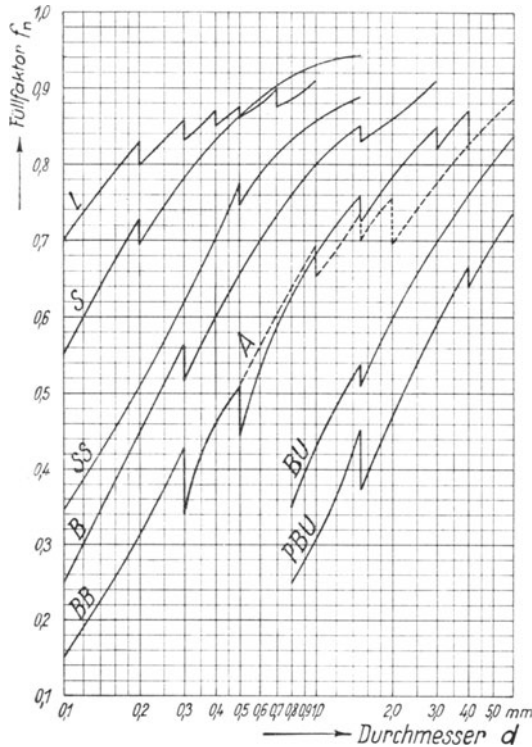


Abb. 38. Füllfaktoren von Dynamodrähten nach Abb. 37.

Die gute Ausnutzung des aktiven Materials elektrischer Maschinen erfordert nach Gl. (3), Abschnitt I, möglichst hohen Nutzfüllfaktor —  $C$  proportional  $f_n$  — und damit auch geringen Isolationsauftrag der Einzelleiter. Die Zunahme der Außenabmessungen von isolierten Dynamodrähten ist abhängig von dem Material und der Art der Isolierung. Je dünner der Isolierstoff — Faden, Folie, Band, usw. — hergestellt werden kann und je weniger Einzelschichten

des Isoliermaterials übereinander liegen — einfache, mehrfache Besspinnung, Beflechtung, Gewebeüberlappung usw. —, um so geringer wird schließlich der Gesamtisolationauftrag. Für runden Kupferdraht ist der Auftrag von Seide-, Papier- und Baumwollisolation und deren Mischung für die verschiedenen Auftragsarten in DIN VDE 6436, für Lackdrähte in DIN VDE 6435 genormt. In Abb. 37 ist die Isolationszunahme von Runddrähten für die im Elektromaschinenbau vorkommenden Leiterdurchmesser von 0,1 bis 6,0 mm z. T. nach Firmenangaben aufgetragen, die entsprechenden Füllfaktoren der Einzeldrähte sind in Abb. 38 angegeben. Man erkennt aus dieser Zusammenstellung die überzeugenden Vorteile der Lackisolation hinsichtlich des Isolationauftrages bzw. des Füllfaktors.

Die heimischen „neuen“ Isolierstoffe benötigen durchaus keinen höheren Auftrag als die bisher verwendeten Materialien. Kunstharzlacke sind in gleicher Filmstärke wie Öllacke herzustellen; die Kunstfasern — Kunstseide, Zellwolle, synthetische Fasern — können zu den gleichen Garnnummern verzwirrt werden wie die Naturfasern Seide und Baumwolle; damit bleibt auch der Auftrag der Kunstfasern mindestens gleich dem der Naturfasern. Nach Angabe der Herstellerfirma lassen sich ferner folienisolierte Dynamodrähte von 60 bis 240  $\mu$  Zunahme entsprechend einer Foliendicke von 30 bis 120  $\mu$  herstellen, so daß der Auftrag beiderseitig unter dem von zweimal Seide bleiben kann. Da Folien aber auch in Stärken unter 30  $\mu$  im Handel sind, bedeutet die Zunahme von 60  $\mu$  noch nicht die untere Grenze. Glasgarne, zuweilen auch als Glasseide bezeichnet, sind in Garnnummern wie Seide und Baumwolle auf dem Markt; wie auch in der amerikanischen Literatur erwähnt, braucht also der Isolationauftrag von Glas den von Seide und Baumwolle nicht zu überschreiten. Isolierende Oxydschichten, z. B. Eloxal, können in beliebiger Schichtstärke aufgebracht werden, so daß diese Isolation dem Ideal nahekäme, wenn nicht die Schicht, wie erwähnt, zum Wachsen Poren benötigen würde, die feine Luftkanäle darstellen mit ihren großen Nachteilen für die elektrische Spannungsfestigkeit.

Für die Profildrähte und ihren Isolationauftrag je Rechteckseite liegen Normen oder Schrifttumsangaben nicht vor. Man kann in etwa die Zunahme der Profilquerschnitte gleich denen der entsprechenden

Ringquerschnitte setzen. Bei Querschnitten über  $30 \text{ mm}^2$  bleibt der Isolationsauftrag nach Firmenangaben konstant — Abb. 39. Unter Hinweis auf die Besonderheiten, die für einzelne Isolierstoffe, wie früher ausgeführt, zu beachten sind, lassen sich Profildrähte grundsätzlich mit den gleichen Materialien wie die Runddrähte isolieren.

Die Wahl der Stärke des Isolationsauftrages wird bei Niederspannungsmaschinen durch die bei der Verarbeitung auftretenden mechanischen Beanspruchungen bestimmt, da die Lagenspannung, die ja nach Nennspannung

und Wickelart verschieden sein kann, bei diesen Maschinen im allgemeinen klein bleibt. Dabei ist zu berücksichtigen, daß der Spannungsbeanspruchung nicht die Nennspannung der Maschine zugrunde zu legen ist, sondern die nach VDE 0530, §§ 50 bis 53, vorgeschriebene Prüfspannung. Bei Hochspannungsmaschinen von etwa  $3000 \text{ V}$  an aufwärts können durch Blitzschläge oder Schalt-

vorgänge in den Leitungen kurzzeitige hohe Überspannungen auftreten, die in Form von „Wanderwellen“ in die Maschine eindringen. Als Schutz hiergegen müssen, sofern keine Kathodenabfalleiter an passender Stelle der Anlage eingebaut sind, die Anfangswindungen der einzelnen Phasen eine stärkere Isolation erhalten als die übrigen Windungen. Um den für die verstärkte Isolation nötigen Raum in der Nut frei zu machen, ist es üblich, die Anfangswindungen aus dünnerem Draht herzustellen oder weniger Windungen in die betreffenden Nuten zu legen.

Wenn auch der Preisanteil der in einer Maschine zu verarbeitenden Isolierstoffe im allgemeinen nur einige Prozent des gesamten Maschinenpreises beträgt, so kann doch der Preis einer neu einzu-

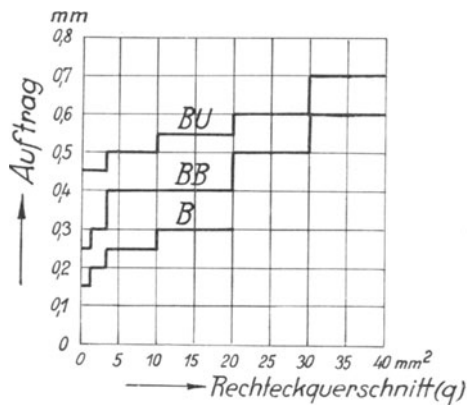


Abb. 39. Isolationszunahme von Profildrähten für verschiedene Arten der Baumwollisolation in Abhängigkeit vom Drahtquerschnitt.

führenden Isolation bei der heute üblichen scharfen Kalkulation besonders der Serienmaschinen eine gewisse Rolle spielen. Tafel XII zeigt für verschiedene Isolierstoffe und Drahtstärken Preise  $P$  in Hundertteilen, bezogen auf Baumwolle, wobei der beiderseitige

Tafel XII.

Preisvergleich von Dynamorunddrähten verschiedener Isolation.  
BB-Isolation = 100 % bei 1,0 mm Draht.

Durchmesser blank mm	BB		L		SS		A	
	$\Delta$ mm	P%	$\Delta$ mm	P%	$\Delta$ mm	P%	$\Delta$ mm	P%
0,5	0,20	192	0,04	130	0,10	304	0,27	1140
1,0	0,22	100	0,05	107	0,12	152	0,22	432
1,5	0,22	84	0,06	101	0,14	116	0,25	285
2,0	0,26	75	0,07	100	0,14	111	0,25	207

Auftrag  $\Delta$  in mm zum Vergleich mit angegeben ist. Jedoch ergibt ein solcher Vergleich kein richtiges Bild, da hierbei die Eigenschaften der verschiedenen Materialien nicht berücksichtigt sind. Wenn z. B. mit einem Stoff ein geringerer Isolationsauftrag bei gleichen mechanischen und elektrischen Festigkeiten zu erreichen ist, kann der etwaige Mehrpreis für die Isolation durch Einsparung an sonstigem Material wieder ausgeglichen werden; das gleiche gilt für einen Stoff größerer Wärmebeständigkeit und Wärmeleitfähigkeit, der außerdem noch eine bessere Sicherheit gegen Überlastung und damit verbunden eine größere Lebensdauer der Maschine ergibt, so daß voraussichtlich die Verwendung teurerer Isolation eine merkliche Verbesserung und unter Umständen sogar eine Verbilligung der Maschine zur Folge hat. Eine überschlägige Untersuchung zeigt folgendes: Bei kleineren Drehstrommaschinen beträgt der Preisanteil der Isolation am Gesamtpreis etwa 3%. Eine Erhöhung der Kosten für die Isolierstoffe um 100% — etwa für heimische Isolierstoffe — würde einen Mehrpreis der Maschine von 3% ergeben. Der Anteil des aktiven Materials am Gesamtpreis beträgt etwa 45%. Eine Verminderung des Gewichts um etwa 7%, die durch die Verwendung



einer mechanisch und thermisch besseren Isolation ermöglicht wird, führt dann dank der höheren Belastbarkeit von Wicklung und Eisen wieder zum ursprünglichen Preis.

Der Vergleich der isolierten Dynamodrähte ohne Berücksichtigung der Tränkung spricht in vielen Punkten — Auftrag, Spannungsfestigkeit, Dehnung und Preis — zugunsten der Lackisolation; wenn trotzdem der Lackdraht sich noch nicht entsprechend seinen Vorzügen durchgesetzt hat, so sollte diese Tatsache für alle Beteiligten, insbesondere die Lackfabrikanten, der stärkste Ansporn sein, nach Verbesserungen zu suchen, selbst wenn damit hohe Entwicklungskosten verbunden sind. Es scheint im Zusammenhang mit der Umstellung von Öl- auf Kunstharzlack angebracht, kurz auf die Prüfung von Lackdrähten einzugehen.

In DIN VDE Blatt 6450 vom Dezember 1934 sind die Bedingungen, denen Dynamodrähte allgemein genügen müssen, zusammengestellt. Sie entsprechen bezüglich der Lackdrähte im wesentlichen auch den amerikanischen Vorschriften, wie aus dem Vergleich — Tafel XV — zu ersehen ist <sup>1)</sup>. Die vielen Rückschläge bei der Umstellung von Öl- auf Kunstharz-Lackdrähte im Elektromaschinenbau rechtfertigen wohl die Änderung einzelner Prüfvorschriften. In diesem Zusammenhang sollen nur die wichtigsten und dringendsten Änderungsvorschläge zu Blatt 6450 zur Sprache gebracht werden.

Besonders hohe Anforderungen stellt der Elektromaschinenbau, wie des öfteren ausgeführt, an die Alterungs- oder Wärmebeständigkeit der Isolierstoffe. Gerade diese Eigenschaft ist bestimmend für die Unbrauchbarkeit einer Reihe von hochwertigen Kunststoffen in elektrischen Maschinen. Das Normblatt 6450 schreibt Alterung mit 100° C für dunklen bzw. 120° C für hellen Lack 3 Stunden lang mit anschließender Wickelprobe vor, während die amerikanischen Vorschriften 100° C für alle Lackarten 48 Stunden lang vorsehen. Nun zeigen aber gerade Lackdrähte auf Kunstharzbasis infolge der Möglichkeit der Nachhärtung bei so geringer Alterung, wie dies im Blatt 6450 vorgesehen ist, sehr verschiedenes Verhalten. Die Kunstharzlackdrähte bestehen in der Regel diese Probe anstandslos; ver-

---

<sup>1)</sup> Siehe Seite 147.

kleinert man jedoch den Wickeldorndurchmesser, so weisen öfters diejenigen Drähte zuerst Risse auf, die bei sehr starker Alterung — z. B. 250° C während 48 und mehr Stunden — die höhere Spannungsfestigkeit besitzen, d. h. also im Gegensatz zu Blatt 6450 als wärmebeständiger angesprochen werden könnten.

Zutreffende Alterungsversuche, vorgenommen mit den Grenztemperaturen der Wärmebeständigkeitsklassen der einzelnen Isolierstoffe, müßten sich über Jahre, und zwar die übliche Lebensdauer der Maschinen erstrecken; Untersuchungen in neuerer Zeit lassen aber unter gewissen Voraussetzungen eine Extrapolation von Kurzzeitversuchen, also hohe Temperatur und geringe Stundenzahl, auf Werte von Betriebstemperatur und Jahre als deren Einwirkdauer als möglich erscheinen. Als Anzeige des Alterungsgrades wird man in Rücksicht auf die starke Versprödung der Lackdrähte und die unvermeidliche große Streuung die Wickelprobe kaum verwenden können. Wie auch durch eigene Versuche bestätigt werden konnte, scheinen Schabezahl, Dehnung und Durchschlagspannung geeignete Anzeigen liefern zu können. Von diesen Prüfungen ist die Spannungsprobe für den ungebogenen, geraden Draht die einfachste.

Um von Kurzzeitversuchen auf Betriebsverhältnisse schließen zu können, muß das Gesetz, nach der die Extrapolation vorgenommen werden kann, bekannt sein; anderenfalls ist ein solches Gesetz aufzustellen. Zu diesem Zweck sind bei verschiedener Alterung die physikalischen Eigenschaften des Isolierstoffes zu ermitteln; z. B. wäre die Durchschlagspannung bei Temperaturen etwa von 125 bis 250° C und Zeiten bis einige tausend Stunden zu messen und in Form der Abb. 4 aufzutragen. Nach eigenen Messungen an Lackdrähten ergaben sich bei Wahl eines geeigneten Maßstabes parallele Geraden als Lebensdauerkurven dieser Drähte unabhängig von der benutzten Anzeigeeigenschaft, z. B. Durchschlagspannung, Dehnung oder Schabefestigkeit.

Die Übertragbarkeit der Versuche an Drähten in die Praxis vermitteln Erfahrungswerte oder Messungen an fertigen Maschinen. Die Festsetzung der Lebensdauer auf Grund von Erfahrungswerten könnte an Hand von Statistiken der Betriebe oder auch der Versicherungsgesellschaften vorgenommen werden. In dem amerikani-

schen Schrifttum wird für Transformatoren als Lebensdauer eine Zeitspanne von etwa 13—14 Jahren, bei täglichem Achtstundenbetrieb [14] als ausreichend angesehen; in der Rev. gen. d'El. 1938 gibt Langlois-Berthelot die Lebensdauer einer „normalen Industriemaschine“ zu 2 Jahren oder rund 17000 Stunden an. Die Betriebstemperatur entspricht dabei der Grenzerwärmung der betreffenden Isolierstoff-Wärmebeständigkeitsklasse.

Die vorstehenden Erfahrungswerte gelten für Klasse A — Isolation. Bei anderen, z. B. neuen Isolierstoffen, muß die Lebensdauer der Maschinen gemessen werden. Zweckmäßigerweise verwendet man hierbei den Kurzzeitversuch. An und für sich genügt die Feststellung der maximalen Betriebsdauer der Maschine, die mit dem zu untersuchenden Isolierstoff gewickelt ist, bei einem beliebigen Temperaturwert, z. B. 175° C. Überträgt man die Zeit, gemessen etwa in Stunden, während der die Maschine bei der gewählten Temperatur betrieben wurde, in die Lebensdauerntztafel der Drähte, so liefern die aus dem Maschinenversuch gewonnenen Werte von Zeit und Temperatur den Teil der Anzeigeeigenschaft, z. B. Durchschlagspannung — Parameter —, der beim „Tod“ der Maschine noch vorhanden war. Extrapoliert man mit diesem Parameterwert, so läßt sich bei vorgegebener Lebensdauer die höchstzulässige Grenzerwärmung und umgekehrt bei vorgegebener Temperatur die zugehörige Lebensdauer aus der Lebensdauerntztafel der Drähte ermitteln. Wie aus eigenen Versuchen hervorgeht, ist der beim „Tod“ der Maschine noch vorhandene Restteil der Anzeigeeigenschaft bei verschiedenen Versuchstemperaturen, z. B. 150°, 175°, 200° und 230° C, im wesentlichen der gleiche. Aus diesen Gründen ist zu erwarten, daß die Lebensdauer der Versuchsmaschinen gemessen etwa in Stunden und in gleichem Maßstab wie die Versuchsergebnisse an Drähten aufgetragen, gleichen Verlauf, z. B. Geraden mit gleicher Neigung wie diese zeigen.

Es liegt in der Natur der Dinge, daß man mit erheblicher Streuung bei diesen Versuchen zu rechnen hat, die einerseits durch die Schwierigkeiten der Einhaltung gleicher Versuchsbedingungen, wie Konstanz der Temperatur, andererseits durch die Ungleichmäßigkeit der Isolation sowohl der Drähte als auch besonders der Maschinen

bedingt ist. Wenn man auch durch Reihenversuche Fehlerquellen möglichst auszuschalten bemüht ist, so kann es sich bei diesen Untersuchungen nach eigener Erfahrung doch nur um Mittelwertbildung handeln, da insbesondere durch die Messungen an der Maschine alle Zufälle bei der Wicklungsherstellung und Fabrikation in dem Ergebnis unvermeidlich zum Ausdruck kommen müssen. Eigene Messungen lassen aber erkennen, daß der Gültigkeitsbereich solcher Versuche weit zu spannen ist. Untersuchungen z. B. an Viskosezellwolle dürften für alle Sonderarten dieses Textilstoffes gültig sein, so daß solche umfangreichen Versuche nur selten erforderlich sind.

Unter der Voraussetzung, daß die Lebensdauer-Netztafel eines „neuen“ Isolierstoffes, z. B. eines Kunstharzlackes bestimmter Zusammensetzung sowie die zugehörigen Maschinenmessungen vorliegen, ist es möglich, eine die Alterungsbeständigkeit voll erfassende Kurzzeitprüfung durch Angabe der Prüftemperatur und Prüfzeit — z. B. 200° C, 48 Stunden — in Form einer Abnahmevorschrift festzulegen. Andere Bestimmungen zur Prüfung der Wärmebeständigkeit, die sich nicht auf vergleichende Maschinenmessungen stützen, entbehren ihrer wichtigsten Grundlage.

Zur Festlegung der Drähte einer Spule untereinander, ferner zur Ausfüllung aller Lufteinschlüsse in den Nuträumen zwischen den einzelnen Leitern und gegebenenfalls in der Leiterisolation selbst müssen kleinere Maschinen nach dem Einlegen der Wicklung oder bei größeren Aggregaten die Einzelspulen in einem besonderen Verfahren getränkt werden. Im Zusammenhang mit der Rohstoffumstellung der Lackdrähte verdient die Prüfung der Tränkefestigkeit dieser Drähte besondere Aufmerksamkeit, zumal bei der raschen Entwicklung und der Mannigfaltigkeit der Kunstharzemaillen Rückschlüsse durch die Verwendung ungeeigneter und zu wenig erprobter Tränklacke eingetreten sind. Diese benötigen zur Erzielung der erforderlichen Viskosität verschiedene Lösungsmittel, die sich gegenüber den Lackschichten der Emailedrähte als aggressiv erwiesen haben. Als Anzeige für die Prüfung auf Tränkefestigkeit von Lackdrähten wurden die Quellung, gemessen durch die Gewichtszunahme,

ferner die „Kratzfestigkeit“, ermittelt durch die in etwa subjektive Nagelprobe, verschiedentlich vorgeschlagen [20, 21].

Zweckmäßiger dürfte eine Prüfmethode sein, die eine mehr oder weniger gute Nachahmung der Beanspruchungen und Verhältnisse der Drähte in der Spule bei und nach dem Vorgang der Tränkung gestattet. Durch das Einschlagen der Keile in die Nut geraten die einzelnen Drähte, die z. B. bei Träufelwicklung durchaus nicht immer sauber nebeneinanderliegen, sondern öfters auch Kreuzungen aufweisen, unter eine mehr oder weniger starke Pressung. Bei der üblichen Vakuumtränkung saugt sich die Wicklung voll von Tränklack; in der anschließenden Trocknung im Ofen, die sich über 10 bis 12 Stunden je nach Ofentemperatur erstreckt, wird das Lösungsmittel des Tränklackes durch Verdampfen ausgetrieben. Zur Pressung der Drähte tritt damit noch eine gewisse Wärmeeinwirkung. Bekanntlich steigt die Anlösung der Emaillenschicht der Lackdrähte mit der Temperatur des einwirkenden Tränklackes erheblich an. Quellen nun unter dem Einfluß des warmen Tränklackes die Isolierschichten der Drähte an der Kreuzungsstelle bis zum Erweichen, so kommt eine galvanische Berührung der beiden Leiter unter dem Keildruck leicht zustande. Der Windungsschluß ist damit unvermeidbar, die Maschine genügt nicht mehr der Spannungsprobe. In der Nut wirken also zusammen: Drahtkreuzung, Keildruck, Tränklack, Temperatur und Lagenspannung; damit ist Anordnung nebst Durchführung der Prüfung auf Tränkfestigkeit von Lackdrähten angedeutet: zwei Lackdrahtstücke werden gekreuzt und unter Druck gesetzt in ein Tränklackbad von bestimmter Temperatur gebracht. Nach der für den benutzten Tränklack vorgeschriebenen Tauchzeit wird die Durchschlagspannung der beiden Drähte ermittelt; deren Abnahme gibt ein Maß für die Beanspruchung des Lackdrahtes durch den Tränklack; Druck, Tränklacktemperatur und -zusammensetzung spielen die Rolle von Parametern. Eigene Versuche ergaben mit gewissen Änderungen in der Versuchsanordnung die Brauchbarkeit dieser Prüfmethode.

Es ist zu erwarten, daß in Rücksicht auf die im vollen Fluß befindlichen Entwicklungsarbeiten an Kunstharzlackdrähten noch bestehende Schwierigkeiten fabrikatorischer Art bei deren Verwendung

baldigst behoben werden; denn die Vorteile, durch geeignete Zusammensetzung die physikalischen Eigenschaften der Emaillacke weitgehend zu ändern, führten zu dem Ergebnis, daß Kunstharzlackdrähte die vorhandenen Öllackdrähte in Durchschlagfestigkeit, Wärme- und Säurebeständigkeit, Dehnung und Biegsamkeit schon jetzt übertreffen.

Zusammenfassend läßt sich feststellen für die Isolation der Einzelleiter:

1. Ausländische organische Faserstoffe: Baumwolle, Seide usw. lassen sich technisch vollwertig durch einheimische Kunstfasern: Zellwolle, Kunstseide und Folien ersetzen.

Entwicklungsaussichten bieten neue synthetische Fasern.

2. Ausländische anorganische Isolierstoffe: Asbest und Glimmer können gegen Glasfasern und Eloxal (Turboläufer) vorteilhaft ausgetauscht werden. Für Hochspannungsmaschinen liegen noch keine Erfahrungswerte in „neuen“ Isolierstoffen vor.
3. Öllacke auf ganz oder teilweise ausländischer Rohstoffbasis sind gegen Kunstharzlacke mit schon besseren Eigenschaften ersetzbar. Tränkschwierigkeiten werden sich in intensiver Zusammenarbeit zwischen Lackchemiker und Elektromaschinenbauer beheben lassen.

Wirtschaftlich liegen Preis und vielfach auch Verarbeitungskosten der heimischen über denen der ausländischen Isolierstoffe; dieser Tatsache kommt in Rücksicht auf den geringen Anteil der Isolationskosten an dem Gesamtpreis der Maschinen in der Regel nur untergeordnete Bedeutung zu.

Die Lackisolation bietet durch geringsten Auftrag, hohe elektrische Festigkeit und damit beste Nutaussnutzung vor allen anderen Isolierstoffen die größten Aussichten auf Verwirklichung einer neuen Entwicklungsstufe des Elektromaschinenbaues. Die weitere Hebung der Wärmebeständigkeit scheint ermöglicht durch den Einsatz der Kunstharze, deren Entwicklung erst im Anfangsstadium steht. Die endgültige und völlig zufriedenstellende Klärung der noch offenen Frage der Tränkfestigkeit wird der Lackisolation den Weg auch in den Elektrogroßmaschinenbau eröffnen.

### c) Spulenisolation

Die Wicklungen elektrischer Maschinen werden meistens ausgeführt: verteilt als Anker- und Kompensationswicklungen oder konzentriert als Erregerwicklungen. Abweichungen von dieser Aufteilung kommen in Sonderfällen vor; aus Festigkeitsgründen ordnet man z. B. die umlaufenden Erregerwicklungen von Turbomaschinen meist verteilt an, während die Ankerwicklung von z. B. kleinen Spielzeugmotoren aus Gründen der Fabrikation und der Billigkeit häufig als konzentrierte Wicklung ausgeführt wird. Die Spannungsbeanspruchung der konzentrierten Wicklung ist im allgemeinen gering; ihre Ausführung wird damit vereinfacht.

1. Verteilte Wicklungen. In der heute allgemein üblichen Ausführung von verteilten Wicklungen in Trommelankern werden, wie erwähnt, jeweils mehrere Windungen zu Spulen zusammengefaßt und in Nuten untergebracht. Durch die Hintereinanderschaltung von Einzelleitern und Spulen treten gegen die Umgebung der Nutbündel je nach Leiterzahl in Serie weit höhere Spannungen als die von Leiter gegen Leiter auf; daher genügt — rein elektrisch — für eine derartige Spannung nicht mehr die Leiterisolation selbst; vielmehr benötigt das Leiterbündel oder die Spule eine weit stärkere Isolierung, die verschieden ist, je nachdem es sich um die Spulenteile innerhalb — Nut — oder außerhalb — Wickelkopf — des aktiven Eisens handelt.

*α) Nutisolation.* Die Isolation der Spulenseite in der Nut soll die Wicklung gegen das Eisen elektrisch und mechanisch schützen. Elektrisch ist sie für die Prüfspannung zu bemessen; mechanisch muß sie den Beanspruchungen bei der Herstellung gewachsen sein, dann aber auch denen des Betriebes genügen, die durch überstehende Bleche und Grate in der Nut und durch Reiben des Leiters, der Isolation und des Blechpakets infolge der verschiedenen Wärme- dehnung dieser Stoffe verursacht werden können. Da diese Beanspruchungen sich mit zunehmender Maschinenlänge verstärken, muß die Dicke der Nutisolation mit wachsender Maschinenlänge ebenfalls vergrößert werden. Bei Niederspannungsmaschinen wird die Isolationsstärke fast ausschließlich durch die mechanische Festigkeit des

Isolierstoffes bestimmt; dagegen sind bei Hochspannungsmaschinen die elektrischen Anforderungen an die Nutisolation ausschlaggebend. Als oberster Leitsatz für die Auslegung der Nutisolation gilt in Rücksicht auf hohe Maschinenausnutzung: Das Anstreben der geringsten Isolationswandstärke zwecks Erzielung des besten Nutfüllfaktors.

Die Ausführung der Nutisolierung richtet sich, abgesehen von Spannung und Maschinenlänge, weitgehend nach Wicklungsart, Nutform und Wärmebeständigkeitsklasse. Wicklungsart und Nutform bedingen sich zum Teil gegenseitig. Formspulen mit Leitern, insbesondere aus massiven Stäben, meist als Zweischichtwicklung, erfordern offene Nuten; für ganz- oder halbgeschlossene Nuten kommen Fädelwicklungen oder Halbformspulen mit einem offenen Wickelkopf in Betracht. Bei kleinen Maschinen werden halboffene Nuten bevorzugt, die die Verwendung der fabrikatorisch günstigen Träufelwicklung gestatten. Die thermischen Beanspruchungen beeinflussen maßgebend die Wahl der Isolierstoffe entsprechend der bekannten Einteilung in Wärmebeständigkeitsklassen (VDE 0530/XII 1937, § 38). Grenzerwärmungen — bei 35° C Kühlmitteltemperatur — von 60° C gemäß Klasse A werden von organischen Isolierstoffen ausgehalten; für höhere Übertemperaturen bis zu 95° C kommen gemäß Klasse B anorganische Isolierstoffe mit Bindemitteln in Betracht.

Im einfachsten Verfahren, das für Hand- oder Maschinenträufelwicklung meist bei Niederspannungsmaschinen Anwendung findet, werden dünne Isolierstreifen in mehreren Lagen in die halboffene Nut eingeschoben, die dann später nach Einlegen der Wicklung überlappt umgebogen und durch Keile oder Bandagen zu halten sind. Als Material für Klasse A wird in der Regel irgendeine Preßspanorte von 0,2 bis 0,4 mm Stärke verwendet. In Sonderfällen benutzt man Preßspan mit Glimmereinlage als gemischte Isolation, wobei dann Preßspan außenliegend den mechanischen Schutz und Glimmer innen die Isolierung übernimmt. Bei höheren Ansprüchen elektrischer und thermischer Natur — Klasse B — kommen Glimmererzeugnisse, wie Biegemikanit, Mikafolium, Mikanit, lackiertes Asbest- oder Glasgewebe als Nutisolation in Betracht. Ferner sind eloxierte



Aluminium- oder lackierte Metallfolien vorgeschlagen worden. Ergebnisse derartiger Versuche liegen bisher noch nicht vor. Störend wirkt bei Eloxalfolien die Hintereinanderschaltung der unvermeidlichen Poren, wodurch die Spannungsfestigkeit einer mehrlagigen Nutauskleidung mit Eloxalfolien problematisch wird. Der geringen Biegefähigkeit könnte durch geeignete Nutform begegnet werden.

Ganz- oder auch halbgeschlossene Nuten werden für Fädelwicklungen mit Hülsen isoliert, die formpassend hergestellt und dann in die Nuten eingeschoben werden können. Je nach den Ansprüchen auf Durchschlagfestigkeit und Wärmebeständigkeit wickelt man zwecks Herstellung dieser Hülsen Lackpapier, Preßspan oder Mikanit geeigneter Stärke und Güte auf besonderen Maschinen unter Anwendung von Druck und Wärme um einen Dorn mit passendem Querschnitt, bis die verlangten Außenabmessungen der Hülse erreicht sind. Auf die Vermeidung von Lufteinschlüssen, die einseitig etwa durch ungleichmäßigen Zug über der Wickelbreite entstehen und bei Hochspannungsmaschinen zur Bildung von Glimmentladungen führen können, ist dabei besonderer Wert zu legen. Der Klebmittelgehalt soll in Rücksicht auf die dielektrischen Verluste möglichst klein gehalten werden.

Auf die Bedeutung eines geringen Abzuges für die Gesamtisolation hinsichtlich der Maschinenausnutzung ist des öfteren verwiesen worden; aus diesem Grunde geizt auch der Maschinenrechner mit jedem Zehntel Isolationsabzug, besonders in der Nutbreite. Hierbei kommt ihm die rein maschinelle Herstellung des Wicklungselementes zur Hilfe. Soweit in Rücksicht auf Streuung und Zusatzverluste irgend möglich, werden in Verbindung mit Zweischichtwicklungen offene Nuten angestrebt. Fertig gebogene, ganze oder Teilwicklungselemente für Stromwender — und auch Wechselstromstände — oder Schleifringläuferwicklungen können als sogenannte Formspulen bei dieser Wicklungsart außerhalb der Nuten auf besonderen Vorrichtungen je nach Wärmebeständigkeitsklasse der Isolation mit Lackpapier, einem Glimmer-, Asbest- oder Glaserzeugnis unter Zusatz geeigneter Klebmittel — Natur- oder Kunstharzlacke — umbandelt und auf geringe Toleranzmaße gebügelt und gebacken

werden. Die Gleichmäßigkeit, Dichte und Güte des Isolationsauftrages dieser maschinellen Wicklungsisolierung übertrifft natürlich bei weitem jede Handarbeit, so daß sie für Hochspannungsmaschinen nahezu ausschließlich zur Verwendung kommt.

Um die Vorteile der Formspulen auch für nicht offene Nuten beibehalten zu können, muß man bei völlig geschlossenen Nuten die im Nutteil maschinell fertig isolierte Wicklung aus Halbformspulen mit einem offenen Wickelkopf ausführen; nach Einschieben der Wicklungselemente sind dann die offenen Leiter des Wickelkopfes in die richtige Form zu biegen, zu verlöten und von Hand zu isolieren. Bei halbgeschlossenen Nuten lassen sich die im Nutteil wieder auf der Maschine fertiggestellten Spulen auch mit beiderseitig geschlossenem Wickelkopf in die Nuten einschieben. Der Wickelkopf ist dann in die richtige Lage zu biegen und wie vorher zu isolieren. Der Nutschlitz muß hierfür eine Mindestbreite haben, so daß der noch nicht umbandelte Wickelkopf durchgeschoben werden kann. Um die äußere elektrisch hochwertige, mechanisch aber empfindliche Isolation der Spulenseiten vor Beschädigungen beim Einbringen der Spulen in die Nuten zu schützen, werden diese vielfach mit einer Papierschicht umklebt; zuweilen legt man auch einen dünnen, nur wenige Zehntel mm starken Preßspan-, „Rutsch“-streifen ein; Papierbeklebung oder Rutschstreifen sind dabei nicht als Isolierstoff, sondern nur als Baustoff zu werten. Statt das Leiterbündel mit einer breiten Isolierstoffbahn zu umpressen, kann es, soweit es sich um die Isolierung von Niederspannungswicklungen handelt, auch mit Lackfaserstoffbändern, Ölleinen oder Folien auf besonderen Maschinen umbandelt werden. Beide Arten: Umpressen und Umbandeln sind auch gleichzeitig möglich.

Steigende Nennspannungen bei Hochspannungsmaschinen bringen wachsende elektrische Beanspruchungen der Nutisolation mit sich, die in Rücksicht auf die nach REM verlangte Sicherheit gegen Gleitfunkenbildung nicht mehr wirtschaftlich durch einfache Verstärkung der Isolation zu beherrschen sind, sondern für Maschinen von etwa 10 kV Nennspannung — verkettet — besondere Maßnahmen erfordern [4].

Glimm- und Gleitentladungen treten auf an den Stellen hoher elektrischer Feldstärke, also kleiner Abstände zwischen Leiter und Eisen (Erde) oder bei Feldverzerrungen. Im Nutteil der Wicklung sind solche Stellen: die Luftschichten zwischen Nuthülse und Zahneisen, ferner die Hülsenausritte an dem Ständerisen in den Lüftungsschlitzten und besonders an den Wickelköpfen. Zur Unterdrückung von Glimmerscheinungen innerhalb der Blechpakete hat sich der Zusatz von Halbleitern oder die Tränkung der äußersten Schichten der Hülse als wirksam erwiesen; Widerstand je  $\text{cm}^2$  Oberfläche dabei etwa  $10^8$  Ohm. Für die Feldverzerrungen an der Innenfläche — also zwischen Rechteckleiter und Hülsen — gilt das gleiche.

Durch die scharfen Blechpaketkanten und die aus dem Ständerisen austretenden Leiter entsteht an dem Übergang zwischen Nut und Wickelkopf eine besonders starke Verzerrung des elektrischen Feldes, die leicht Glimm- und Gleitentladung zur Folge hat. Durch Potentialsteuerung, entweder nach Art einer Nagelschen Klemme [22] oder durch Aufwickeln eines leitenden Belages — etwa einer Metallfolie —, der mit dem Eisenkörper in direkter Verbindung steht, kann einfache und ausreichende Abhilfe geschaffen werden. An Stelle des leitenden Belages läßt sich aber auch ein Widerstandsbelag auf den Hülsenausritt aufbringen, etwa durch Anstrich mit Halbleitern, z. B. Graphit [23]. Durch einen solchen Belag wird die Spannung entlang der Hülse allmählich praktisch auf den Wert Null gesteuert, und zwar so, daß an keiner Stelle der Hülsen die Festigkeit der Luft überschritten wird. Besser bewährten sich besonders imprägnierte stabile Asbestbänder mit hohem Widerstand von etwa  $10^8$  bis  $10^9$  Ohm/ $\text{cm}^2$ , die fest um die Hülse gewickelt, nicht von der Hülsenoberfläche abspringen oder von den Entladungen abgetragen werden. Die Spannung zwischen Hülsenoberfläche und Eisenstirnflächen wird durch den Spannungsabfall, bedingt durch die Verschiebungsströme in der Isolierhülse und dem Widerstand des Belages, in ziemlich genau berechenbarer Form ausgeglichen [4].

In Abb. 40 sind qualitativ die Ergebnisse der Verwendung des Metalls (Kurve 1) und des Widerstandsbelages (Kurve 2) angegeben. Die Anfangsneigung der Kurven gibt ein Maß in kV/cm für die elek-

trische Feldstärke  $\mathcal{E}$  am Hülsenaustritt. Die Überlegenheit des Widerstandsbelages geht aus der Abb. 40 eindeutig hervor.

Diese Maßnahmen genügen für einen bis 100 kV Prüfspannung ausreichenden Glimmschutz [4].

Grenzleistungsmaschinen weisen als Spitzenleistung des Elektromaschinenbaues in der Regel in allen Beanspruchungsarten des Materials Grenzwerte auf. Die Leistungsgrenze je Maschineneinheit wird zur Zeit vom Turbogenerator gehalten, bei dem die Anforderungen an die Isolation gegenüber anderen Maschinen besonders hoch liegen.

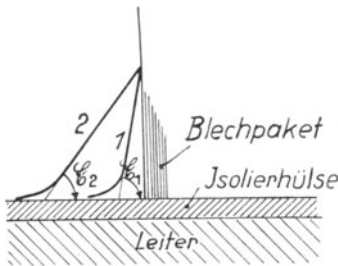


Abb. 40. Elektrische Feldstärke am Leiteraustritt aus dem Blechpaket für verschiedene Arten der Potentialsteuerung.

Hohe Umfangsgeschwindigkeiten — 150 bis 170 m/sec —, große Ballenlänge — bis 6 m — bedingen für den Turboläufer erhebliche mechanische Beanspruchungen der Isolation.

Als Leiter werden in der Regel Flachbänder aus Kupfer oder Aluminium verwendet; Glimmererzeugnisse haben bei der Leiter- und Nutisolation der Turboerregewicklungen lange Zeit gute Dienste getan, wenn auch die elektrischen Beanspruchungen bei den Turboläufnern wegen der geringen Erregergleichspannung gegenüber den mechanischen und thermischen Anforderungen sehr stark zurücktreten. Die Leistungssteigerung je Maschineneinheit und die damit verbundene Vergrößerung der Ballenlänge brachten im Wechselspiel der Erwärmung und Abkühlung der Maschine auch eine Verstärkung der Unterschiede in der Längenänderung zwischen Leiter, Isolation und Nutwand, d. h. also eine Erhöhung der Reibebeanspruchung der Isolation. Die hochgradige Spaltbarkeit des Glimmers und die begrenzte Wärmesicherheit des üblichen Klebmittels Schellack führten zu der Kombination Kunstharz—Asbest. Wie die Praxis zeigt, stellt diese Isolation einige bemerkenswerte Fortschritte dar [24]; neben nur geringer Festigkeitsabnahme in der Wärme weist sie nahezu gleiche Ausdehnungskoeffizienten wie das

Leitermaterial auf; es dehnt sich also die Spule im ganzen; damit entfallen alle mehr oder weniger komplizierten Konstruktionen und Vorkehrungen in den Wickelköpfen unter den Kappen zum Auffangen der Längsausdehnungen. Die Beanspruchung auf elektrische Festigkeit bleibt infolge der geringen Erregerspannung auch für Asbest genügend gering.

Eine weitere wesentliche Verbesserung der Temperaturverhältnisse des Turboläufers brachte aber die erhebliche Erhöhung — nahezu Verdoppelung — der Wärmeleitfähigkeit der Kunstharz—Asbestgegenüber der Glimmer—Schellack-Kombination. Bei gleicher Grenztemperatur läßt diese Erhöhung des Wärmeleitwertes eine Leistungssteigerung von etwa 20% im Mittel zu.

Im Zusammenhang mit Grenzleistungsbetrachtungen im Turbobau haben verschiedene Autoren immer wieder in den Zeiten der Entwicklung neuer Leistungsstufen auf eine Verwendung von Al-Wicklungen im Läufer hingewiesen [25]. Vor- und Nachteile von Aluminium gegenüber Kupfer als Leiterwerkstoff stehen hier nicht zur Diskussion. Allerdings ermöglicht Aluminium als Leiterisolation Eloxal mit den bekannten guten Wärmebeständigkeiten und -leitfähigkeit in sehr geringer Auftragsstärke. Ob und inwieweit zur Nutauskleidung eloxierte Aluminiumfolien benutzt werden, geht aus der einschlägigen Literatur nicht hervor.

Die in den letzten Jahren auch in Europa gesteigerten Anforderungen an die Betriebsspannungen großer Turbogeneratoren, die durch den direkten Anschluß der Stromerzeuger an das Verbrauchernetz dicht besiedelter Industriegebiete oder Großstädte mit Spannungen zwischen 20 bis 50 kV gegeben sind, bedingen wohl hier interessierende Sondermaßnahmen in der Durchbildung der Ständerwicklungsisolation. Wirtschaftlichkeitsberechnungen unter Berücksichtigung der Anlage- und Betriebskosten des Satzes: Zwischentransformator + Normalspannungsgenerator (6 bis 11 kV) einerseits und der des Höchstspannungsgenerators andererseits, führen mit Geltung bis 50 MVA zur Faustregel: Klemmenspannung = KVA Leistung [26]. Bei der Durchbildung solcher Höchstspannungsgeneratoren ist Voraussetzung, daß die einschränkenden Grenzerwärmungsbedingungen der REM 0530/XII, § 39, Tafel IVb,

Anm. 8: Herabsetzung der Grenzübertemperaturen um  $1,5^{\circ}\text{C}$  je 1000 V bei Maschinen über 7000 V — modifiziert werden.

Bekanntlich liefert der Rundquerschnitt die gleichmäßigste Verteilung des elektrischen Feldes; demgemäß wurden von verschiedenen Firmen für 36 kV-Wicklungen runde Leiter in konzentrischer Anordnung mit Spannungsabstufungen der einzelnen Ringleiter oder Einzelanordnung in übereinanderliegenden Nuten verwandt [27]. Zur Beherrschung der Koronaerscheinung ist mehrfach die Verlegung der Höchstspannungswicklung in ein Ölbad vorgeschlagen

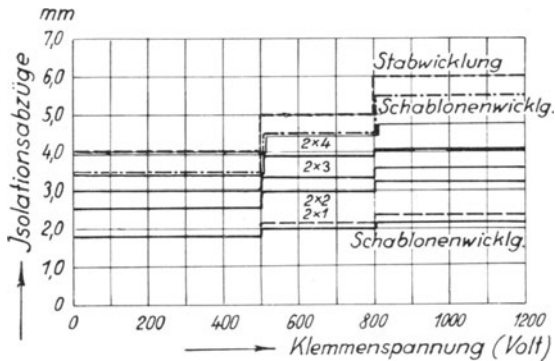


Abb. 41. Isoliationsabzüge für Zweischicht (Stromwenderwicklung) in Abhängigkeit von der Klemmenspannung in Volt bei verschiedener Leiterzahl je Nut.

worden, dem allerdings erhebliche Konstruktions- und Kühlschwierigkeiten des Läufers entgegenstehen. Ein anderer Vorschlag sieht Abstufung der Nutisolation nach der Spannung der Einzelleiter gegen Eisen in Verbindung mit Trapeznuten vor, wobei in allen Nutbündeln die Einzelleiterspannungen von der Bohrung gegen den Nutgrund ansteigen [28]. Wenn auch die wirtschaftlichen Vorteile des „Höchstspannungsgenerators“ unbestritten sind, so hemmt doch die ungeklärte Frage der Betriebssicherheit ihre allgemeine Einführung in die Versorgungsnetze. Der Bau eines 100-kV-Generators dürfte zur Zeit problematisch sein. Die Entwicklung auf diesem Gebiet ist noch zu sehr im Fluß, um heute gültige Spannungsgrenzen anzugeben. Immerhin scheinen sich 36-kV-Generatoren bisher anstandslos bewährt zu haben.

Die Stärke der Nutisolation in der praktischen Ausführung muß selbstverständlich neben ihren direkten Bestimmungsgrößen, wie Spannung, Isolationsart — Hand- oder Maschinenisolierung —, auch allen Fabrikationsfaktoren — Einrichtung der Werkstatt, Güte der Werkarbeit und dgl. — Rechnung tragen. Man findet daher bei den einzelnen Firmen öfters größere Unterschiede in den internen Anweisungen für Nutisolutionsabzüge; es erübrigt sich daher und ist — allgemeingültig — auch nicht möglich, beste, d. h. kleinste Isolationsabzüge in Nutbreite und -tiefe für Isolierstoffe der verschiedenen Wärmebeständigkeitsklassen anzugeben. In Abb. 41 sind für Strom-

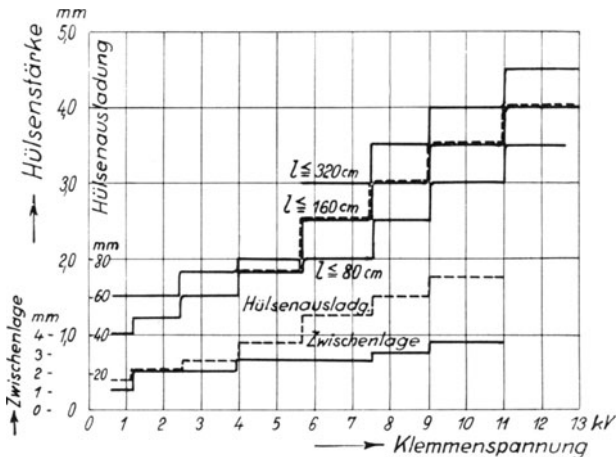


Abb. 42. Hülsenstärke, Hülseausladung und Zwischenlage für Wechselstromwicklungen in Abhängigkeit von der Klemmenspannung in kV für verschiedene Blechpaketlängen.

wenderwicklungen und Schleifringläuferwicklungen nach Werten der Literatur [29] mittlere Isolationsabzüge in Abhängigkeit von der Spannung für etwa 40 cm Ankerlänge aufgetragen. Die Einzelleiterisolation, gerechnet als  $BB$ , ist in diesen Angaben eingeschlossen. Die beiden oberen Linienzüge geben den Isolationsabzug in der Nuttiefe (ohne Keil), strichpunktiert für die Schablonenwicklung, gestrichelt für die Stabwicklung. Andere Maschinenlänge, Nut-schrägung, Nutschnitttoleranzen, Isolationssonderanforderungen, z. B. Feuchtigkeitsbeständigkeit, sind in diesen Werten nicht berücksichtigt. Für Wechselstromwicklungen zeigt Abb. 42 Angaben über

mittlere Hülsenstärke, -Ausladung und Zwischenlagendicke bei Zweischichtwicklung [30]. Das Spiel zwischen Hülse und Nutwand ist nur von der Maschinenlänge  $l$  abhängig und beträgt  $\approx 0,3$  mm bei 80 cm,  $\approx 0,6$  mm bei 160 cm und  $\approx 0,8$  mm einseitig bei 320 cm Ankerlänge. Bei Kleinstmotoren verwendet man vielfach den Begriff des Kupferfüllfaktors  $f_k$ , der in Abb. 43 für Lackdraht in Abhängig-

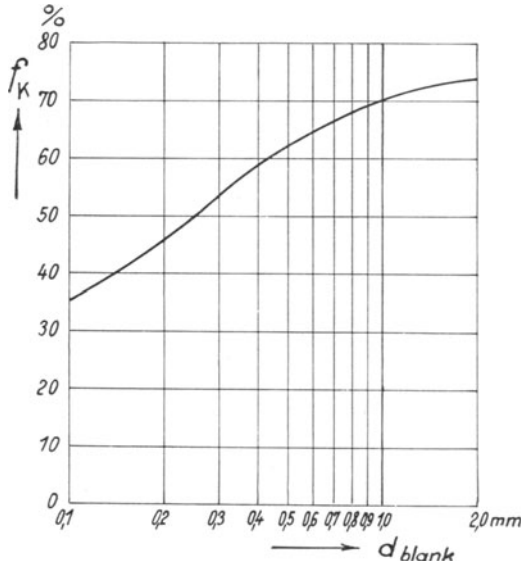


Abb. 43. Kupferfüllfaktor  $f_k$  in Abhängigkeit vom Drahtdurchmesser  $d$  für Lackisolation.

keit von dem Durchmesser des blanken Drahtes für den lichten Nutraum aufgetragen ist; dabei wurde mit quadratischem Drahtquerschnitt für völlige Ausfüllung der Fläche gerechnet; die Rundungen des tatsächlichen Querschnittes blieben unberücksichtigt.

Der Forderung auf Verwendung heimischer Stoffe kann für die Nutisolation weitgehend Rechnung getragen werden. Celluloseerzeugnisse, z. B. Preßspan, Hartpapier, Zellwollgewebe und -bänder, Folien usw., stehen für Maschinen der A-Klasse in hinreichender Güte mit bisher guten Erfahrungen ausreichend zur Verfügung. Als Austauschstoffe für Glimmer und Asbest kommen Glasgewebe und -bänder in Betracht, wobei nach amerikanischen Angaben für



Niederspannungsmaschinen bisher die besten Erfahrungen gemacht werden konnten. Da bei getränktem Glasgewebe im wesentlichen der Lack als Isolator anzusehen ist, man aber bei längerem Betrieb Risse im Lack befürchtet, konnte sich Glas als Nutisolation für Hochspannungsmaschinen noch nicht durchsetzen; es fehlen dem getränkten Glasgewebe die Überlappungen der Glimmererzeugnisse, z. B. Mikafolium. Daher wird man notgedrungen bei Hochspannungswicklungen der Klasse B noch wie bisher auf Glimmer als Nutisolation nicht verzichten können; das gleiche gilt wohl auch für Turboläufer, bei denen die geringe Scheuerfestigkeit der Glasgewebe ihre Verwendung erschwert.

β) *Wickelkopfisolation*. Mit Rücksicht auf die Kühlung sollten die Wickelköpfe möglichst wenig isoliert sein, da gerade hier im Frischluftstrom — offene Maschinen vorausgesetzt — die Möglichkeit besteht, den größten Teil der Wicklungswärme abzuführen. Bei kleineren Maschinen erhält daher der Wickelkopf außer der Leiterisolation im allgemeinen keine zusätzliche Isolierung; höchstens werden Streifen aus Preßspan oder Ölleinen zwischen die einzelnen Spulen bzw. Phasen gelegt und zur Versteifung an verschiedenen Stellen die einzelnen Leiterbündel durch lack- oder ölgetränktes Baum- oder Zellwollband zusammengehalten. Die Leiter selbst werden durch Tauchen in einen Tränklack und anschließendes Trocknen zusammengebacken. Dieser Tränklack kann zugleich als Schutzlack gegen Feuchtigkeit und eventuelle besondere chemische Beanspruchungen dienen. Um größere Wicklungsfläche und damit bessere Kühlung zu erreichen, wird es zweckmäßig sein, soweit es die räumliche Anordnung des Wickelkopfes gestattet, die einzelnen Nutleiterbündel am Wickelkopf durch Zwischenlage von Hartpapier- oder Holzstücken weiter zu unterteilen.

Bei höheren Spannungen müssen die Spulenköpfe untereinander und vom Blechpaket einen gewissen Abstand einhalten. Abb. 44. Fädel- und Träufelwicklungen erfordern im Spulenkopf ein- oder mehrmaliges Umbandeln mit Faserstoffbändern, das von Hand ausgeführt wird und daher größere Abstände von Spule zu Spule als bei Formwicklungen verlangt. Zur besseren Versteifung werden

meist noch mehrere Spulenköpfe, z. B. eines Wicklungsstranges, **zusammengefaßt**; zur **Einhaltung** des gegenseitigen Abstandes werden **Distanzstücke** passender Abmessungen aus **Preßspan**, **Hartpapier** oder **Holz** eingelegt; das Ganze wird dann umbandelt.

Man unterscheidet zwischen **Trocken-** und **Naßumbandlung**. Bei der **Trockenumbandlung** — für Spannungen unter 4 kV — wird der **fertig umbandelte Spulenkopf** außen mit einem **Lackanstrich** versehen; bei der **Naßumbandlung** — Spannungen über

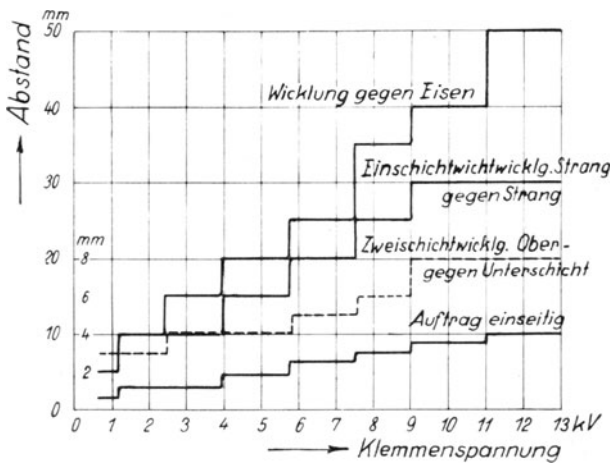


Abb. 44. Wickelkopfabstände und -auftrag für verschiedene Wicklungsarten in Abhängigkeit von der Klemmenspannung in kV.

4 kV — ist jede **Lage** nach der Umbandlung zu lackieren, so daß **alle** **Lufteinschlüsse** möglichst **vermieden** werden. Außer der höheren **Sicherheit** gegen elektrische **Durchschläge** oder **Ozonbildung** infolge **Glimmentladungen** erhält man mit der **Naßumbandlung** durch die **größere Isolationsdichte** des Wickelkopfes auch eine **bessere Wärmeleitfähigkeit**. Besondere **Aufmerksamkeit** erfordert der **Übergang**: **Hülse—Wickelkopf**; man läßt die **Umbandlung** der **Einzelspulenseite** in die **Nuthülse** hineingehen und **verhindert** somit **Luftpolster** an der **Stoßstelle** der **Nuthülse—Wickelkopf**.

Bekanntlich bedingen die **Kurzschlußstromkräfte** je nach der **Länge** der **Wickelköpfe** mehr oder weniger **kräftige Halte- oder Stützkonstruktionen**. Die **Wicklungsbolzen**, die in die **Stirnplatten**

des Ständergehäuses eingeschraubt und damit geerdet sind, kommen den spannungsführenden Teilen der Wickelköpfe sehr nahe, so daß hier besondere Abschirmung des elektrischen Feldes notwendig wird. Selbst bei Höchstspannungsmaschinen bildet die Wickelkopfisolation als solche kein Problem, da die elektrische Beanspruchung durch genügend große Abstände von Leiterbündel zu Leiterbündel in gewünschten Grenzen gehalten werden kann. Durch Potentialsteuerung ist man aber in der Lage, die an den Abstützungen auftretenden Feldungleichheiten so zu beherrschen, daß ein Glimmen sich auch bei den verlangten Prüfspannungen nicht einstellen kann [23].

2. Konzentrierte Wicklungen. Ruhende Polwicklungen weisen im Vergleich zu rotierenden Ankerwicklungen sehr geringe mechanische Beanspruchungen auf. Da die Erregerspannung meist klein ist, sind auch die elektrischen Anforderungen unbedeutend. Weitgehende Unterteilungen des Wicklungsquerschnittes, die durch die Platzverhältnisse gestattet sind, beseitigen etwaige Schwierigkeiten der thermischen Beanspruchungen. Nur bei Bahnmotoren ist man häufig gezwungen, durch Klasse B-Isolation den Platzbedarf der Wicklung zu beschränken.

Nebenschlußwicklungen benötigen in der Regel viele Drähte mit geringen Rund- oder Rechteckquerschnitten, während Hauptstromwicklungen für Erreger- oder Wendepole nur wenige Windungen mit großen Leiterquerschnitten erfordern. Bei großen Stromstärken kommen sogar selbsttragende lackierte Flachschiene in Betracht. Im übrigen sind die gleichen Leiterisolationen wie bei Ankerwicklungen verwendbar.

Als Lagenisolation werden je nach Wärmebeständigkeitsklasse Cellulose- und Glimmererzeugnisse oder Asbestgewebe eingewickelt, wobei ohne weiteres Glas an Stelle von Glimmer und Asbest treten könnte. Dünndrätige Spulen für kleinere Maschinen mit ungenügender Eigensteifigkeit erhalten eine Umbandlung. In der Regel werden alle diese Spulen getränkt; man kann dann auf besondere Isolation des Polkernes verzichten und die getränkte und umbandelte Spule ohne weiteres auf den nackten Polkern aufschieben.

Mittlere und größere Maschinen erfordern in Rücksicht auf festen Zusammenhalt des großen, aus vielen Windungen bestehenden Spulenquerschnittes besondere kastenförmige Wicklungsträger. Diese können je nach mechanischer Beanspruchung aus Isolationsmaterial oder aus Metall: Eisen, Messing- oder Aluminiumblech hergestellt werden. Selbstverständlich sind diese Metallspulenkästen mit passenden Isolierstoffen, wie Lackpapier, Preßspan, Glimmererzeugnissen, getränktem Asbest- oder Glasgewebe auszukleiden und zu verkleben.

Umlaufende, konzentrierte Erregerwicklungen, die für große Synchronmaschinen mit Einzelpolen in Frage kommen, zeigen vielfach hohe mechanische — große Umfangsgeschwindigkeit — und beachtliche thermische Beanspruchungen — hohe Stromdichte infolge Lage im radialen Innenteil der Maschine — ; aus diesen Anforderungen ergeben sich einlagige Spulen mit hochkantgebogenen, blanken Bandleitern, die durch dünne Zwischenlagen aus Papier, Glimmer, Asbest oder auch Glas gegeneinander zu isolieren sind. Die Isolationszwischenlage beträgt in Rücksicht auf geringe Wickelhöhe 0,15 bis 0,20 mm. Die gewickelte Spule wird zusammengepreßt, getaucht, gebacken und in den zweckentsprechend isolierten Spulenkasten gebracht, der dann unter Druck verschweißt wird. Bei Langpolen verhindern Klemmkonstruktionen in den Pollücken ein Ausbiegen der Flachleiter.

Bei Maschinen mittlerer Umfangsgeschwindigkeit kann der Spulenkasten wegfallen; die Wicklung bleibt unverändert. An Stelle der Kastenisolation tritt die des Kernes. Die Pressung der Wicklung kann durch die Halteschrauben des Poles erfolgen.

In der Verwendung von Heimstoffen zur Isolierung von konzentrierten Wicklungen gelten die gleichen Gesichtspunkte wie für die Isolation der verteilten Wicklungen, wobei die, wie angeführt, geringe elektrische Beanspruchung der Erregerwicklungen sogar noch etwas günstigere Voraussetzungen liefert.

#### **d) Stromabnahme an rotierenden Wicklungen**

**Stromwender:** Für die Betriebssicherheit von Stromwendermaschinen spielt die Kommutierung eine ausschlaggebende Rolle.

Zu einer einwandfreien Stromwendung ist ein konstruktiv gut durchgebildeter, mechanisch fester Kommutator die unerläßliche Vorbedingung. Die für die Lamellenisolation verlangte Lichtbogen-sicherheit kann zur Zeit nur durch Glimmer zufriedenstellend garantiert werden. Kunststoffe, deren Schichtdicke als Folien oder Platten in Maßhaltung völlig den Ansprüchen auf Genauigkeit der Isolationsdicke zwischen den Lamellen des Stromwenders genügt, verbrennen unter der Einwirkung von Lichtbögen, wobei sich an den Überschlagentellen leitende Brücken verkohlten Materials bilden; daher kann zur Zeit Glimmer als Lamellenisolation durch einen anderen Isolierstoff vollwertig nicht eingetauscht werden.

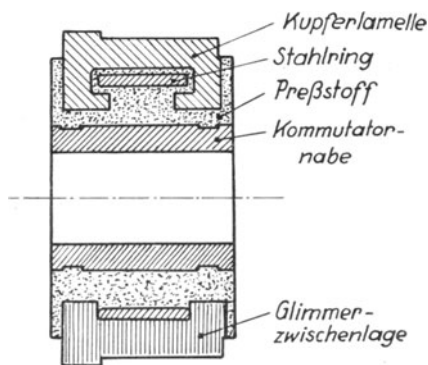
Die Stärke der Kommutatormikanitschichten als Lamellenisolation richtet sich nach der Höhe der Stegspannung; sie kann auf Sondermaschinen auf genaue Dicken von 0,4 bis 2,0 mm geschliffen werden unter Einhaltung einer Toleranz von 0,02 mm. Große Kommutatoren erfordern aus Festigkeitsgründen harte Glimmersorten, die nach Kupferabnutzung auszukratzen sind; mittlere und kleinere Stromwender gestatten die Verwendung weicher Glimmerarten in ungefähr gleicher Härte wie Kupfer, so daß durch geeignete harte Bürsten vorstehende Stegisolationen gleichmäßig abgerieben werden und der Kommutator beim Lauf von selbst rund bleibt; damit erübrigt sich hier ein Auskratzen der Lamellenisolation.

Die Grenzerwärmung für Stromwender beträgt je nach Wärmebeständigkeitsklasse der Ankerwicklung 60 bzw. 75° C; soweit Isolierstoffe der A-Klasse zur Verwendung kommen, werden sie als organische Stoffe an lichtbogenfreien Konstruktionsteilen eingesetzt; daher finden sich als Isolation des Stromwenderbelages gegen die Kommutatornabe Preßstoffe, Hartpapiere, Kunstharze usw. Die Befestigung des Kommutatorbelages, bestehend aus den einzelnen Lamellen mit zugehöriger Mikanitisation, richtet sich nach dem Durchmesser und der Länge, ferner nach der Umfangsgeschwindigkeit des Kommutators. Bei kleinen Stromwendern, etwa bis 200 mm Durchmesser und 100 mm Länge, können Belag und Nabe in Preßstoffe, Kunstharze usw. eingepreßt werden. In die stark ausgerundeten Schwalbenschwänze der Lamellen sind zur Erhöhung der Fliehkraftfestigkeit besondere durch die Lamellenisolation in ihrer

Lage fixierte Stahlringe eingebettet, etwa nach untenstehender Skizze [31].

Mittlere und größere Kommutatoren erhalten schwalbenschwanzförmige Lamellen mit etwa  $35^\circ$  Keilwinkel. Je nach Preßkonstruktion kann man V-Ring, Trommel- und Gewölbebauform unterscheiden [32].

Die Isolierung der Lamellen gegen die Nabe erfolgt durch Manschetten aus Formmikanit, Hartpapier oder Preßspan. Der Innendurchmesser des Kupferbelages wird mit gleichem Isoliermaterial gegen die Nabe abgedeckt. Bei höheren Kommutatorspannungen verlängert man die Manschette Z-förmig ins Innere des Stromwenders. Die Isolationsstärke der Manschetten schwankt nach



Durchmesser des Kommutators zwischen 1 und 2 mm, geht bei Hochspannungsmaschinen von mehreren tausend Volt Klemmenspannung bis auf 4 mm.

Umfangsgeschwindigkeiten am Stromwender über 40 m/sec erfordern Turbokonstruktion, bei der Lamellen mit schwach kegeligen Sitzflächen durch Schrumpfringe auf passende Nabenflächen gepreßt werden.

Als Isolation zwischen Schrumpfring und Kommutatorbelag kommt nur druckfester Mikanit in Betracht mit etwa 5 mm Stärke. Gegen die Nabe genügt eine 2 mm dicke Mikanitzwischenlage. Überstehende Kriechwegisolierringe auf der Nabe bzw. den Preßringen sind bei allen Kommutatorausführungen gegen Abblättern durch Schnurbandage zu sichern.

Schleifringe. Durch Fliehkräfte gering beanspruchte Schleifringe können wie bei Stromwendern, wenn notwendig, in Schwalbenschwanzkonstruktion ganz oder teilweise in Kunstharz eingegossen werden. Bei größeren Maschinen, z. B. Läufer von Asynchronmotoren, werden die Schleifringe unter Zwischenlage von Hartpapier-

Preßspan- oder Kunstharzscheiben mit Bolzen, die durch Lackpapier-, Preßspan- oder Mikanithülsen isoliert sind, an die Nabe geschraubt. Schleifringe großen Durchmessers, wie diese für große Einankerumformer in Betracht kommen, werden vielfach in Gußkonstruktion nach Art eines Speichenrades ausgeführt und unter Zwischenlage von Hartpapierbuchsen und -scheiben auf eine besondere Nabe gesetzt. Turboläufer erfordern eine Schrumpfkonstruktion; auf einen Stahlring, der mit einer Isolierzwischenlage aus Mikanit auf die Nabe geschrumpft ist, wird der eigentliche Schleifring aus Kupfer ebenfalls durch Schrumpfung aufgebracht. Die Anschlußbolzen der Schleifringe sind mit Lackpapier, Preßspan- oder Mikanithülsen zu umpressen.

Bürstenträger. Bei Stromwendern sitzen die Bürstenhalter gewöhnlich auf den blanken Bolzen mit runden oder profiliertem Querschnitt, die zugleich die Stromleitung übernehmen. Diese Bolzen müssen dann an ihren Haltekonstruktionen etwa mittels Scheiben und Büchsen aus Hartpapier, Kunstharz oder Mikanitpreßstoffen isoliert befestigt werden. Die Stromabnahme erfolgt durch die Bolzenverbindungsringe. Bei Schleifringen sitzen die Bürstenhalter gewöhnlich auf runden Bolzen, die auf der ganzen Länge durch Büchsen aus Papier oder Kunststoffen isoliert sind. Die Stromabnahme geschieht am Bürstenhalter selbst.

Zusammenfassend kann über die Austauschmöglichkeiten von Isolierstoffen an Stromabnehmerkonstruktionen bei umlaufenden Wicklungen — Stromwender und Schleifringe — angegeben werden, daß bei der Lamellenisolation der Stromwender auf Mikanit-Glimmererzeugnis nicht verzichtet werden kann, für alle anderen Isolierstellen, wie Naben, Bolzen usw., abgesehen von Turbokonstruktionen, in Lack-, Hartpapier und Preßspan geeignete heimische Werkstoffe zur Verfügung stehen.

### e) Blechisolation

Die Bedeutung der Isolation von Dynamoblechen für Eisenfüllfaktor und Temperaturverteilung bzw. Wärmeleitfähigkeit, also Maschinenausnutzung, führte im Laufe der Zeit zu verschiedenen

Ausführungsarten der Blechisolation. Bekannt und bewährt hat sich seit langem die Papier- und Lackisolation. Auch Wasserglas ist für diesen Zweck vorgeschlagen worden. In jüngster Zeit versucht man mit guten Erfolgen Rostschutzverfahren zur Isolierschichtbildung heranzuziehen. In Sonderfällen kann man sich mit der Oxydschicht des Eisens zur Isolierung begnügen.

Maßgebend für den theoretischen Füllfaktor ist die Isolationschichtstärke. Der tatsächliche Füllfaktor liegt durch die unvermeidliche Unebenheit der Bleche etwas tiefer. Papier, einseitig beklebt, selbst in der Stärke von 25 bis 35  $\mu$ , bringt den größten Auftrag aller Isolierungsarten. Eine gewisse Rostgefahr ist durch die hygroskopischen Eigenschaften der in Betracht kommenden Seidenpapiere gegeben. Die Temperaturgrenze liegt bei etwa 110° C; die Stanzfestigkeit der Seidenpapiere genügt den zu stellenden Ansprüchen. Füllfaktoren und Wärmequerleitfähigkeitswerte sind am Ende dieses Abschnittes zusammengestellt.

Lacke lassen sich nach Firmenangabe in Schichtstärke von 10 bis 30  $\mu$  herstellen und am wirtschaftlichsten durch Gummiwalzen auf die Bleche aufbringen. Füllfaktor und Wärmeleitfähigkeit liegen höher als bei Papierisolation. Es werden luft- und ofentrocknende Öl- und Kunstharzlacke verwendet, wobei die lufttrocknenden Öllacke den Vorzug der Billigkeit, die ofentrocknenden Kunstharzlacke dagegen den Vorteil der erheblich höheren Wärmebeständigkeit aufweisen. Die Stanzfestigkeit aller Lacke ist ausreichend.

Wasserglas scheidet Feuchtigkeit ab und zerfällt bei längerem Einwirken höherer Temperaturen. Aus diesem Grunde ist man von seiner Verwendung abgekommen.

Eine weitere Isolierungsart beruht auf chemischer Umsetzung des Eisens. Bei dem als Bondern bekannten Rostschutzverfahren wird das Eisen in ein Bad getaucht mit einer Lösung von Eisen-Mangan-Phosphaten in Wasser; dadurch wandelt sich die Eisenoberfläche um in unlösliche, wärmebeständige Phosphate. Diese Schicht besitzt einen genügend hohen Isolationswiderstand, um die Bleche gegen die geringen hier auftretenden Spannungen zu isolieren. Ein gewisser Nachteil liegt darin, daß nur fertig gestanzte Bleche gebondert werden können, da die Schicht nicht stanzfrei ist. Aller-



dings braucht nur jedes zweite Blech, das durch das Tauchen doppelseitig isoliert wird, gebondert zu werden; dadurch wird die Verteuerung der Isolierung, die durch die geringe Stanzfestigkeit bedingt ist, zum großen Teil wieder wettgemacht. Da die Stanzgrate mitisoliert werden, sind voraussichtlich die Eisenzusatzverluste gering. Messungen über Durchschlagspannung und Isolationswiderstand etwa in Abhängigkeit von Druck und Temperatur, ferner über Druck-

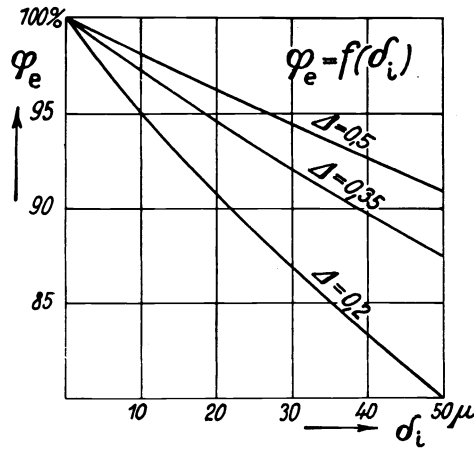


Abb. 45. Blechfüllfaktor  $\varphi_e$  in Abhängigkeit von der Isolationsdicke  $\delta_i$  in  $\mu$  für Bleche verschiedener Stärke  $\Delta$  in mm.

und Scheuerfestigkeit, Alterungsbeständigkeit, Wärmeleitfähigkeit usw. der Bonderschicht liegen noch nicht vor. Der Isolationsauftrag ist äußerst gering und schwankt etwa zwischen 5 bis 10  $\mu$ , je nach Stärke der Bonderung, so daß Füllfaktor und Wärmequerleitfähigkeit gute Werte zeigen.

In Abb. 45 sind in Abhängigkeit von der Isolationsdickedie  $\delta_i$  in  $\mu$ , die Werte der theoretischen Füllfaktoren  $\varphi_e$  für verschiedene Blechstärken  $\Delta$  als Parameter aufgetragen. Tafel XIII gibt die Werte der Wärmequerleitfähigkeit  $k_q$  in % der Wärmelängsleitfähigkeit  $k_l$  für Dynamobleche an;  $k_l = 50$ ; geringe Wärmeleitfähigkeit der Eisenbleche geben zu Wärmestauungen in den einzelnen Blechpaketen der Maschine Anlaß, die sich nur durch weitgehende axiale Unterteilung des aktiven Eisens auf Kosten der Maschinen-

länge in zulässigen Grenzen halten lassen. Verbesserungen der Größe  $k_a$  bedeuten stärkeren Wärmefluß in axialer Richtung und eine Erhöhung der Wirkung der Lüftungsschlitze, wodurch deren Zahl herabgesetzt und die Maschinenlänge verkleinert werden kann. Konstante Erwärmung ist in beiden Fällen vorausgesetzt.

Maßgebend für die Wärmequerleitfähigkeit sind neben der Pressung der Bleche Art und Dicke der Isolation. Die im Schrifttum angegebenen Werte  $k_i$  der Wärmeleitfähigkeit der als Blechisolation in Betracht kommenden Isolierstoffe zeigen große Unterschiede; die in der Tafel XIII benutzten Größen  $k_i$  sind Mittelwerte; so gilt der Wert 0,1 für Papier und Wasserglas, 0,3 für Lack, 1,0 für kristalline Schichten, zu denen die Bonderung wohl gezählt werden kann; 0,5 ist als Zwischenwert eingefügt.

Tafel XIII.

Wärmequerleitfähigkeit von Dynamoblechen verschiedener Stärke  $\Delta$  in % der Wärmeleitfähigkeit  $- 100\% = 50 \text{ Watt}^\circ \text{C m}$  — bei variablem Blechisolationsauftrag in  $\mu$ , verschiedener Isolationswärmeleitfähigkeit  $k_i$  und unter Annahme einer Luftschicht  $\delta_L$  zwischen den einzelnen Blechen von 1,00  $\mu$  bzw. 0,00  $\mu$ .

$\Delta$	$k_i$	$\delta_L$	Isolationsauftrag in $\mu$				
			10	20	30	40	50
0,20	0,10	1,00	3,30	1,93	1,40	1,15	0,97
		0,00	4,23	2,16	1,62	1,19	0,99
	0,30	1,00	5,88	4,37	3,48	2,68	2,47
		0,00	11,26	6,24	4,42	3,13	2,82
	0,50	1,00	7,56	5,88	4,72	4,23	3,72
		0,00	17,50	10,00	7,18	5,72	4,81
	1,00	1,00	9,10	7,92	7,05	6,42	5,89
		0,00	30,00	18,52	13,52	10,92	9,26
0,35	0,10	1,00	5,10	3,16	2,29	1,82	1,51
		0,00	6,72	3,58	2,48	1,92	1,57
	0,30	1,00	9,63	7,31	5,41	4,38	3,68
		0,00	17,86	10,60	6,92	5,28	4,26
	0,50	1,00	12,20	9,38	7,56	6,60	5,42
		0,00	27,40	15,76	11,32	8,96	7,48
	1,00	1,00	14,45	12,48	10,95	9,90	8,95
		0,00	42,40	27,50	20,50	16,60	14,00
0,50	0,10	1,00	7,28	4,34	3,15	2,48	2,06
		0,00	9,28	4,96	3,42	2,64	2,16
	0,30	1,00	13,45	9,60	7,50	6,20	5,33
		0,00	23,60	13,60	9,64	7,52	6,24
	0,50	1,00	16,20	12,65	10,35	8,87	7,75
		0,00	34,00	20,80	15,14	12,00	10,00
	1,00	1,00	19,60	16,50	14,55	13,10	12,00
		0,00	51,00	34,60	26,50	21,60	18,38

Durch Unebenheiten der einzelnen Bleche, z. B. kleine Warzen oder Grübchen, läßt sich eine dünne Luftschicht zwischen benachbarten Blechen nicht vermeiden. Die Dicke dieser Schicht hängt von der Pressung der Blechpakete ab, ist aber zahlenmäßig genau kaum festzulegen. Andererseits verringert eine dünne Luftschicht, deren Leitfähigkeit  $k_L$  zu etwa 0,029 Watt/m<sup>0</sup> C nach der Literatur angenommen werden kann, die Querleitfähigkeit der isolierten Bleche unter Umständen erheblich. Der Einfluß einer Luftschicht  $\delta_L$  von 1,0  $\mu$  Dicke — ein Wert, der der Größenordnung nach zutreffend sein dürfte — auf  $k_q$  geht aus Tafel XIII hervor; diese zeigt, daß dicke Bleche mit geringer Schichtstärke einer Isolation von guter Wärmeleitfähigkeit — z. B.  $\Delta = 0,5$ ,  $k_i = 1,0$ ,  $\delta_L = 0$ ,  $k_q = 0,51 k_i$ ;  $\delta_L = 1,0 \mu$ ,  $k_q = 0,196 k_i$  — zur Erzielung möglichst geringer Luftschichten zwischen den einzelnen Blechen — kleines  $\delta_L$  —, also hohe Pressung erfordern, wenn die thermischen Vorteile der betreffenden Isolation gewahrt bleiben sollen.

## Anhang

Der jeweilige Stand der Technik im Elektromaschinenbau findet einen wesentlichen Niederschlag in den Vorschriften, die für Bewertung und Prüfung elektrischer Maschinen erlassen sind; Anpassung der einschlägigen Bestimmungen und Entwicklung in Theorie und Praxis sollen möglichst Hand in Hand gehen, wobei das Tempo der Änderungen der Vorschriften unter Umständen von außergewöhnlichen Zeitläuften besonders beschleunigt werden kann. Es dürften in diesem Zusammenhang die in den Bestimmungen der beiden bedeutendsten Weltproduktionsländer elektrischer Maschinen — Deutschland und Amerika — zutage tretenden Auffassungen über die zulässige Beanspruchung von Isolierstoffen interessieren. Der Vergleich kann sich auf die Frage der Erwärmung beschränken, da die mit dieser im engsten Zusammenhang stehenden thermischen Eigenschaften ausschlaggebend für die bevorzugte Verwendung eines Isolierstoffes im Elektromaschinenbau sind; nur die wesentlichsten Punkte sollen behandelt werden.

Es trifft sich für die Aufstellung eines solchen Vergleiches gerade günstig, daß in jüngster Zeit sowohl von deutscher als auch von amerikanischer Seite Vorschläge für eine teilweise Neufassung der Maschinennormalien herausgekommen sind, die als Vergleichsgrundlage dienen können [33]. In vielen Fragen sind die deutschen und amerikanischen Vorschriften praktisch einander gleich; es interessieren daher nur die in nachstehender Tafel angegebenen Abweichungen.

Die amerikanischen Vorschriften fügen eine besondere Klasse 0 der ungetränkten organischen Isolierstoffe ein; Lackdrähte fungieren noch in Klasse A.

Grenzwerte der Temperatur werden in den AJEE-Standards als „hottestspot“-Temperatur bezeichnet; diese Temperaturen der

## Wärmebeständigkeitsklassen:

REM			AJEE-Standards		
Klasse	Isolierstoff	Behandlung	Klasse	Isolierstoff	Behandlung
			0	Baumwolle, Seide, Papier oder ähnliche organische Stoffe	weder getränkt noch in Füllmasse
A	Baumwolle, Zellwolle, Seide, Kunstseide und ähnliche Faserstoffe	getränkt oder in Füllmasse	A	1. Baumwolle, Seide, Papier oder ähnliche organische Stoffe 2. Gegossene oder geblätterte Stoffe mit Cellulosestoffen, Phenol- oder andere Harze ähnlicher Eigenschaften 3. Filme und Folien von Celluloseacetaten und anderer, celluloseähnlicher Eigenschaften 4. Lack (Emaile) für Drähte	getränkt oder in Füllmasse
B	Glimmer- und Asbestpräparate und ähnliche mineralische Stoffe Lackdraht, wärmebeständige Kunststoffolien (z. B. Triacetatfolie) nach VDE	mit Bindemittel	B	Glimmer-, Asbest-, Glasfaser und ähnliche anorganische Stoffe	mit Bindemittel; Klasse A-Stoffe als Bindemittel in geringer Menge
B <sub>H</sub>	Glimmer, Asbest- und Glasfaserzeugnisse und ähnliche mineralische Stoffe	mit Bindemittel und anderen organischen Bestandteilen von höchstens 30%			
C	Glimmer, Porzellan, Glas, Quarz und ähnliche feuerfeste Stoffe	ohne Bindemittel	C	Glimmer, Porzellan, Glas, Quarz und ähnliche anorganische Stoffe	

„heißesten Stelle“ entsprechen den deutschen Grenzwerten für die Temperatur (§ 39 der REM).

REM		AJEE-Standards	
Klasse A, ungetränkt	80° C	Klasse 0	90° C
Klasse A	95° C	Klasse A	105° C
Klasse B <sub>H</sub>	130° C	Klasse B	130° C
Klasse C	—	Klasse C	—
Lackdraht	115° C	Lackdraht	105° C
Klasse B	115° C		

Besonderheiten der Wicklungsausführungen, z. B. einlagige Feldwicklungen (REM § 39, Tafel IV a; 2) oder Hochspannungsmaschinen (REM § 39, Tafel IV b) sind in diesen Zusammenstellungen nicht berücksichtigt.

Die Temperatur des Kühlmittels bei Maschinen mit Selbstkühlung oder Eigenlüftung ist nach § 37 der REM mit zwei oder mehreren Thermometern in 1 bis 2 m Entfernung von der Maschine zu messen; die Standards sehen diese Messung in unmittelbarer Nähe der Maschine vor ohne genauere Abstandsangabe für die Thermometer. Als Grenzwert der Kühlmitteltemperatur gelten nach § 39 der REM 35° C, nach den Standards 40° C. Damit ergeben sich als Grenzwerte der Erwärmung (Kühlmittel gegen „heißeste Stelle“).

REM		Standards	
Klasse A, ungetränkt	45° C	Klasse 0	50° C
Klasse A	60° C	Klasse A	65° C
Klasse B <sub>H</sub>	95° C	Klasse B	90° C
Klasse C	—	Klasse C	—
Lackdraht	80° C		
Klasse B	80° C		

Besondere Bestimmungen über Grenzerwärmungen von großen Hochspannungsmaschinen — REM § 39, Tafel IV b — sind in diesen Neubearbeitungsvorschlägen für die Standards nicht enthalten.

Bekanntlich ist die Bestimmung der Höchsttemperatur einer Maschine mit großen Schwierigkeiten verbunden, da die heißeste Stelle meist unbekannt oder unzugänglich ist. In § 33 sehen die REM die Bestimmung der Wicklungserwärmung durch Widerstands-

messung oder durch Thermometermessung an der „vermutlich heißesten zugänglichen“ Stelle vor, wobei der höhere der beiden Werte gelten soll. In den Standards werden zur Berücksichtigung dieser Schwierigkeiten Differenzwerte normalisiert für den Unterschied zwischen der Temperatur an der „heißesten“ und der „Meß“-Stelle. Diese Differenzen sind abhängig von der Meßmethode und betragen für Ausdehnungsthermometer 25 % und für die anderen 10 %.

**Vereinbarte Temperaturdifferenzen**  
(heißeste ÷ Meßstelle)

Meßmethode	Klassen		
	0	A	B
Thermometer .....	15	15	20
Widerstands- oder Thermo- element- messung .....	5	5	10

Durch Festlegung dieser Differenztemperaturen ergeben sich folgende Grenzerwärmungen für die Meßstelle:

**Meßstellen-Grenzerwärmung**

Meßmethode	Klasse			Bemerkungen
	0	A	B	
Thermometer .....	35	50	70	} luft- oder gasgekühlte Maschinen
Widerstands- oder Thermo- elementmessung .....	40	60	80	
Widerstandsmessung .....		55*		ölgelkühlte Maschinen

\* Der Unterschied gegen Luftkühlung ist bedingt durch die Rücksicht auf die Lebensdauer von Trafoöl.

Beim Vergleich der Meßstellenerwärmung beider Vorschriften liegen die Grenzwerte der REM durchweg höher; dieser Unterschied ist aber auf die Ungenauigkeit der Messung der Maschinentemperatur — vermutlich heißesten zugänglichen Stelle — in den deutschen Vorschriften zurückzuführen. In den Temperaturgrenzwerten, die für die Lebensdauer einer Isolation ausschlaggebend sind, bestehen in der Klasse B<sub>H</sub> keine Unterschiede — 130° C —; in Klasse A liegen

die amerikanischen Werte um 10° C höher, dagegen beträgt der Grenzwert für Lackdraht deutscherseits 115° C gegen 105° C nach den Standards.

Die Zunahme der Grenzerwärmung der Maschinen infolge geringerer Wärmeabgabe bei Höhen über 1000 m ü. d. M. als Aufstellungsort ist in den amerikanischen Vorschriften zahlenmäßig für je 100 m zu 1% bei luftgekühlten Maschinen, zu 0,2% je 100 m bei hauptsächlich durch Strahlung gekühlten Maschinen festgelegt. Diese Zahlen entsprechen den Kurven, die Dettmar in den Erläuterungen zu den REM 1930, S. 30, angegeben hat.

Tafel XIV a.

Elektrische Prüfungen an festen, biegbaren Isolierstoffen nach VDE-Bestimmungen.						
1	2	3	4	5	6	
Prüfmethode (Bezeichnung nach VDE)	Vorbearbeitungen	Hauptmittel der Messung (Apparate u. Instrumente.)	Maßergebnisse (Dimensionen)	Anwendungen, gemäß VDE-Bestimmungen	Schriften außer VDE-Bestimmungen	
2	a) Oberflächen- abspolmethode VDE 0302, B1 a VDE 0303; 2  b) mech. Bearbeitung 0302; B, 1 c) mech. Bearbeitung 0303; 4 a, b	a) Schneidapparat Galvanometer statischer Spannungsmesser 1000 Volt Gleichspannung 0302; B, 1	in Megohm oder VDE Vergleichs- zahlen; 12 - 6	Hartpapier 0316-17 Isolierpressstoffe 0320, 4, 14 Hartgummi 0322; 15	Pf. S. 70 + 77 Houw. S. 578 + 579	
3	Durchgangswider- stand (Widerst. ab- h. Temp.) VDE 0308; B 2 VDE 0303; 10, 11	4 Tage in Luft 80% rel. Feuchtigkeit .0320; 15 0322; 14	(Stanni- Säpfe) Zink-Silber Galvanometer Gleichspannung 40, 220, 1000 V. 0302; B; 2, 0303; 10 a, b; 11	in Megohm	Präseam 0315; 13 Hartpapier 0318; 18 Isolierpressstoff 0320; 18 Hartgummi 0322; 16 Mehrl. G. Dehm 0320; 7	Pf. S. 77 + 90 Houw. S. 578 + 579
4	Lichtbogen- sicherheit VDE 0302; B 3	—	Reinkohlen 8mm Ø 220 Volt = —	Stufen 0, 1, 2, 3	Elektrolackpappe 0318, 8 Asbestseifenplatten 0314; 4	Pf. S. 159 + 160
5	Durchschlagspan- nung (Durchschlag- festigkeit) VDE 0303; 16, 17	b, 0302, 4 für 0312, 10 a, b, 0302, 4 für 0316, 20	Rollen 25; 50mm Ø Elektroden Kugeln 10, 20, 50-Ø 0303 18, 19 Holzen 25, 50 Tromm. Belege, Rollen- Außen-Belege	in KV oder KV/cm	Elektrolackpappe 0318, 8 Hartgummi 0322, 15 Isolierbänder 01478	Pf. S. 149 + 150 Houw. S. 581 + 586
6	Durchschlagfestig- keit (Durchschlag- festigkeit) VDE 0303; 21	4 Tage liegen in Luft von 80% rel. Feuchtigkeit für 0320, 16 und 0322, 16	Elektroden: Kreisplatten 10 x 25 x 10mm bei 50 u. 800V/1/2 100, 300, 500, 1500 oder 2000 Volt	Zahl in Tausendstel	Hartpapier 0316, 20 Isolierpressstoff 0320, 16 Hartgummi 0322, 16	Pf. S. 90 + 149 Houw. S. 581 + 572
6a	Durchschlagspan- nung (Durchschlag- festigkeit) VDE 0302; 26	4 Tage liegen in Luft von 80% rel. Feuchtigkeit für 0322, 16	Elektroden: Eisenplatten Wechselstrombrücke	Zahlen größer 1 + 10	Hartgummi 0322, 16	Pf. S. 89 + 93 Houw. S. 581 + 572
7	Abschleif- festigkeit (nach Haus- VDE- Bestimmungen)	—	Schneidenelektroden 300 Volt bei 50-; Max. Strom auf 3 Amp. begrenzen.	Tropfenzahl oder bei const. Proben- zahl je Zeiteinheit; ark Zeit selbst.	Isolierpressstoffe 0320, 17	Pf. S. 100/161 Houw. S. 586 + 585 Houw. S. 95 + 97



Tafel XIV b.

Mechanische Prüfungen an festen Isolierstoffen nach VDE-Bestimmungen						
1	Eigenschaften (Messung nach VDE)	Vorbereitung	Hauptprüfmittel der Prüfung (Apparate u. Instrumente)	Messergebnisse (Dimensionen)	Anwendungen, VDE- Bestimmungen	Schrifttum außer VDE-Bestimmungen
2	Zugfestigkeit	Formuläre 2, Platten 0318, 16 DIN 770, 24 h in Luft bei 65% rel. Feuchtigkeit Messung nach 0318, 16	Zugprüfmaschine (Schuppen Hydraul. Überdruck für Nähre.	in kg/cm <sup>2</sup> Reißlänge in cm für Fasernstoffe	Presspan 0315, 10 Hartpapier 0318, 16 Asbestzementplatten 0331, 7	Pr. S. 176 + 185 Hau. S. 532 + 533
3a	Druckfestigkeit	—	Universalprüfmaschine von Mohr u. Dehmann Pr. S.	in kg/cm <sup>2</sup> 170, 766, 768	Hartpapier 0318, 15	Pr. S. 186 + 189 Hau. S. 533 + 534
3b	Kugeldruckhärte 0302 A3	—	Kugeldruckprüfapparat von Schopper	Harthegrad in kg/cm <sup>2</sup> nach 60 S	für alle feste Isolier- stoffe	Pr. S. 191 + 194 Hau. S. 534 + 535
4	Biegefestigkeit 0108 A1	30 Tage in Petroläther bei Zimmertempera- tur	Biegefestigkeitsprüfger- ät (Schopper) Dynastgerät Universalprüfgerät	in kg/cm <sup>2</sup> Mindestwerte 0380, 10, 0382, 10	Hartpapier 0318, 16 Isolierpressstoffe 0380, 10 Harzgummi 0382, 10 Nichtliche Gesteine 0380, 10 Asbestzementplatten 0331, 7	Pr. S. 196 + 203 Hau. S. 525 + 527
5a	Schlagbiegefestigkeit 0302 A2	Flachstäbe	Normalpendelschlag- werk (Schopper) Dynast- Gerät	in cm/kg <sup>1/2</sup> Mindest- werte 0380, 10, 0382, 10	Hartpapier 0318, 13 Isolierpressstoffe 0380, 10 Harzgummi 0382, 10 Asbestzementplatten 0331, 7	Pr. S. 203 + 204 Hau. S. 525 + 527
5b	Kerzschlagigkeit	U-Kerbe in Normal- stab oder 1/3 Probendicke	Normalpendelschlagwerk (Schopper) Dynastgerät	in cm/kg <sup>1/2</sup> Mindest- werte 0380, 10, 0382, 10	Isolierpressstoffe 0380, 10	Pr. S. 210 + 215 Hau. S. 530 + 532
6	Elastizitätsprüfung	—	Fallwerk 0313, 6 Abs. 2	Beobachtung des Prüfobjekts auf Spil- ten des Geräts	Elektrischpapier 0313, 6	—
7	Scherfestigkeit (Sonderprüfung)	—	Stempel u. Lochplatte 20 mm ø	keine Scherung	Elektrischpapier 0313, 7	—
8	Spaltbarkeit (Sonderprüfung)	—	Schneidele nach 0318, 16 Biege- oder Druckfestig- keitsprüfgerät	Widerstand gegen Spalten in kg	Hartpapier 0318, 16	Pr. S. 194 + 196 Hau. S. 535
9	Faltzahl (Sonderprüfung für leicht biegbare Stoffe)	24 h in Luft von 65% relat. Feuchtigkeit	Faltgerät (Schopper)	Zahl der Doppel- faltungen, Mindestwert 0315, 11	Presspan 0315, 11	Pr. S. 225 + 226

Tafel XIV c.

Prüfungen auf chemische Beständigkeit.						
1	Eigenschaften Messungen nach VDE	Vorbereitung	Hilfsmittel der Prüfung	Messergebnisse	Anwendungen auf besondere Isolier- stoffe, n. VDE-Bestimm.	Schrifttum außer VDE- Bestimmungen
2	Wasser (Feuchtigkeits)- aufnahme 0318, 22	4 Tage in destillier- tem Wasser	Waage	Gewichtsänderung in %; Messartweise von Abb. 7 0318, 22	allgemein Hartpapier 0318, 22	Pr. S. 266 + 272 Hau. S. 546 + 551
3	Feuchtigkeitsgehalt	6 h bei 105°C trocknen 4 h bei 70°C trocknen	Waage	Gewichtsdifferenz 387 Wassergehalt ab 0353, 3	Presspan 0315, 7 Asbestzementplatten 0331, 7	Pr. S. 21 Hau. S. 19
4	Feuchtfempfindlichkeit	Anblasen v. Wasser - u. etwa 80°C - 5 l/min	—	keine sichtbaren Änderungen	Elektrischpapier, fertige Stücke	—
5a	Beständigkeit gegen Schwefeläure 0303, 7.1	3 Wochen Lagerung in 25%-iger Schwefeläure	Waage	Gewichtsänderung und Aussehen	Als Vorbereitung nach 0303, 7.1	Pr. S. 276 + 281
5b	Beständigkeit gegen Ammoniakdampf 0303, 7.2	3 Wochen einwirken von Ammoniakdampf	Waage	" " nach 0303, 7.2	" " nach 0303, 7.2	"

Tafel XV.

		Prüfung von Lackschichten nach deutschen und amerikanischen Normen. deutsch: DIN VDE 6450    amerikanisch: Standards C85-87-1936		4	
		2	3	Deutsch	Amerikanisch
1	Geprüfte Eigenschaft	2	3	Deutsch	Amerikanisch
1	Stärke des Isolationsauftrages	Vorbereitung der Probe Deutsch Amerikan.	Durchführung der Prüfung Deutsch Amerikanisch	Unterschied der beiden Durchmesser	
2	Abwicklungsbeständigkeit	Lack abbenetzen oder abwischen. Proben in Tropfball von 100°C 6 h lang   44 h lang legen	Lackschicht nach dem Abkühlen abreiben	Lack darf sich nicht abwischen lassen.	
3	Alterungsbeständigkeit	3 h lang   48 h lang auf schwerer Last bei 100°C erhitzen. Heiler (Lackauftrag) zern.	Nach dem Abkühlen, Wärmeproofung vornehmen	Draht muß den Prüfungen standhalten.	
4	Durchschlagsfestigkeit	Lackschicht am polierten Metallzylinder (Ø nach Tabelle) nach 10 min mit Gewicht belasten	Zylinder und Leiter an 50 Hz legen, die in 1/2 min von 0 bis Durchschlag gesteigert wird	Durchschlagsspannung nach Tabelle in Abhängigkeit vom Durchmesser	
5	Dehnung		0,5 m Lackschicht mit 1-2 cm/sec. bis 25% (bei geringerer Dehnung bis Bruch) dehnen.	Mit 2-facher Lupe dürfen keine Beschädigungen sichtbar sein.	Mit bloßem Auge bei 15... 25°C dürfen keine Beschädigungen sichtbar sein.
6	Verhalten beim Wickeln		Lackschicht auf Zylinder-Dorn wickeln Dorn-Ø s. Tabelle Dorn-Drehzahl 100/min.	Mit 2-facher Lupe dürfen keine Sprünge sichtbar sein	Mit bloßem Auge sollen keine Anzeichen der Erwärmung sichtbar sein, die ungewönl. Glanz aufweisen können.
7	Erweichen	2 Lackschicht zusammenpressen, 200°C erhitzen.	Lackschicht auseinandernehmen.		
8	Isolationsfehler		Lackschicht bis 0,4 mm Ø mit 0,7-1 cm/sec durch Quecksilberbad (20 mm Durchmesser) führen	Fehtellen ermitteln mit Zähler oder schreiben dem Messgerät.	
9	Feuersicherheit		Lackschicht wagtrecht in Flamme halten.	Lackschicht darf bei Entzündung nicht flammen aus Feuer herausrücken. Draht nicht entzündet laufen.	
10	Tränkfestigkeit	Lackschicht 1 min. in Phenolmasse, 5 min. in Zinklösung und 5 min. in Essigsäure bei 100°C tauchen.	Nach Herausnehmen aus Phenolmasse mit Lappen abwischen.	Lackschicht darf keine blauen Stellen aufweisen. Lack nicht erweichen sein.	

## Schrifttumsverzeichnis

- [1] W. Büssing, Vereinfachte Berechnung der Erwärmung elektrischer Maschinen. A. f. E. 1940, S. 473.
- [2] H. Stäger, Elektrotechnische Isoliermaterialien. Buch. Stuttgart, Wiss. Verlags-G. m. b. H., 1931.
- [3] Michailow, Über die Tränkung von Isolierstoffen. ETZ. 1930, S. 1158.
- [4] Eberspächer u. Stach, Beitrag zur Isolierung von Hochspannungsmaschinen. Siemens-Zeitschrift 1934, S. 88.
- [5] A. Meißner, Isolierstoffe mit erhöhter Wärmeleitfähigkeit. ETZ. 1934, S. 1193—1218.
- [6] W. Patnode, E. J. Flynn, J.-A. Weh, Synthetisches Material als Drahtisolation. AIEE. 1939, S. 379.
- [7] A. Jenny, Die elektrolytische Oxydation des Aluminiums und seine Legierungen. Buch. Verlag Steinkopf, 1938.
- [8] Retzow, Eigenschaften der elektrischen Isolierstoffe in graphischer Darstellung. Buch. Berlin, Springer, 1927.
- [9] Montsinger, Die Temperaturbeanspruchung des Transformators. AIEE. 1930, S. 776; Langlois-Berthelot, Die Lebensdauer elektrischer Maschinen. Rev. Gen. d'El. 1938, S. 527.
- [10] J. Scheiber, Lacke und ihre Rohstoffe. Buch. Leipzig, Verlag Barth, 1926.
- [11] Bodenbender, Zellwolle. Buch. Berlin-Steglitz, Chem.-Techn. Verlag, 1939.
- [12] Schindler, Theoretische Ermittlung von Nummer, Gewicht und Isolationszunahme von Baumwollgarnen. ETZ. 1930, S. 716.
- [13] Hobart, Die Isolierung elektrischer Maschinen. Buch. Berlin, Springer, 1906.
- [14] Schüler, Die Wärmebeständigkeit von Baumwolle und Papier. ETZ. 1916, S. 535.
- [15] Hill, Temperaturgrenzen für Öl und Celluloseisolation. AIEE. 1939, S. 484.
- [16] Vieweg u. Pfestorf, Natürliche Isolierstoffe. ETZ. 1933, S. 539; Fehlmann, Erläuterungen über die Leitsätze zur Lieferung von Asbestzeugnissen. ETZ. 1931, S. 364.
- [17] Mathes u. Stewart, Asbest und Glasfasern als Magnetspulvisolation. AIEE. 1939, S. 290.
- [18] Nowak u. Wolter, Das Verhalten technischer Cellulosestriesterfolien bei höherer Temperatur. Kunststoffe 1940, S. 129.

- [19] Atkinson, Glasfaser, eine anorganische Isolation. AIEE. 1939, S. 277; Ferris u. Moses, Glasfaser als elektrotechnisches Isoliermaterial. AIEE. 1938, S. 480; Prüfungen an Glasfasern. Coil. Talk. Nat. el. Coil. Comp. Sept. 38; W. Büssing, Glasfäden als Isolierstoff für elektrische Maschinen. EuM. 1939, S. 377.
- [20] Raskop, Isolierlacke. Buch. Verlag Krayn, 1938; Der VDE-Entwurf 0360. Elektro-Technik 1940, Heft 47; Carstens, Betrachtungen über den Entwurf VDE 0360. Elektro-Technik 1940, Heft 42; VDE, Leitsätze für die Prüfung von Isolierlacken. ETZ. 1940, S. 832—1175; Burmeister, Praktische Erfahrungen mit Isolierlacken, insbesondere auf Kunstharzgrundlage. Kunststoffe 1940, S. 367.
- [21] Greulich, Einwirkung von Lösungsmittel und Imprägnierlacken auf Lackdrähte. Zeitschr. f. Elektrochem. u. angew. phys. Chem. 1938, S. 627.
- [22] Schwaiger, Elektrische Festigkeitslehre. Buch. Berlin, Springer, 1925.
- [23] D. R. P. 155285; 341145; 431206; 443011; 508373; 525577; 553644; 597308; 649877; Schenkel, Ein Turbogenerator für 40 kV Prüfspannung. Siemens-Zeitschrift 1930, S. 396; Beldi, Gegenwärtiger Stand der Isoliertechnik im Großmaschinenbau, insbesondere bei hohen Spannungen. EuM. 1932, S. 541; Dünner, Neuerungen und Fortschritte auf dem Gebiete der elektrischen Isoliermaterialien. Bulletin des SEV. 1932, S. 112; Kroker, Isolationsfragen im Elektromaschinenbau. VDE-Fachberichte 1936, S. 97.
- [24] Kneller, Über die Läuferisolation von Turbogeneratoren. VDE-Fachberichte 1936, S. 94.
- [25] Rickli, Mechanischer Sicherheitsgrad großer Turbogeneratoren. Bulletin des SEV. 1930, S. 397; Dünner, Rückblick über die Entwicklung des Elektromaschinenbaues in den letzten Jahren. Bulletin des SEV. 1931, S. 177; Punga, Die Läuferkühlung von Turbogeneratoren und ihr Einfluß auf die Grenzleistung. ETZ. 1936, S. 608.
- [26] Wiedemann, Fortschritte im Bau von Turbogeneratoren. VDE-Fachberichte 1939, S. 163.
- [27] Parsons, Stromerzeugung bei 36000 V. Z. VDI. 1933, S. 953.
- [28] Hering, Eine neue Ständerwicklung für Turbogeneratoren hoher Betriebs- und Prüfspannung. Siemens-Zeitschrift 1931, S. 187.
- [29] Trettin, Starkstromtechnik von Rziha-Seidener. Buch. Verlag Teubner, 1930, Bd. I.
- [30] Heiles, Wicklungen elektrischer Maschinen und ihre Herstellung. Buch. Berlin, Springer, 1936.
- [31] D. R. P. 622894, Kleinkommutatoren.
- [32] Wiesemeyer, Gestaltung und Fertigung von Stromwendern. ETZ. 1938, S. 1090.
- [33] AJEE Nr. 1, Juni 1940; ETZ. 1941.

## Hefte der „Sammlung Vieweg“

- |      |  | Preis geh. in RM. |
|------|--|-------------------|
| 94.  | <b>Halbmikromethoden zur automatischen Verbrennung organischer Substanzen und ebullioskopischen Molekulargewichtsbestimmung.</b><br>Von Prof. Dr. Ed. Sucharda und Ing. B. Bobrański. III, 37 S., 6 Abb. | 2,45              |
| 95.  | <b>Die Bildtelegraphie.</b><br>Ing. Paul Werk. IV, 86 S., 39 Abb. u. 3 Tafeln.   | 5,20              |
| 96.  | <b>Die Atmosphäre als Kolloid.</b><br>Prof. Dr. A. Schmauss u. Prof. Dr. Alb. Wigand. IV, 74 S., 10 Abb.   | 4,30              |
| 97.  | <b>Röntgenographische Werkstoffprüfung.</b><br>Dr.-Ing. Karl Becker. IV, 100 S., 76 Abb.   | 6,30              |
| 98.  | <b>Der Kampf um das Kausalgesetz in der jüngsten Physik.</b><br>Dr. Hugo Bergmann. X, 78 S.  | Vergriffen        |
| 99.  | <b>Die deutsche Tafelglasindustrie.</b> Ihre Bedeutung für die nationale Wirtschaft unter Berücksichtigung der Konkurrenzindustrien Belgiens und der Tschechoslowakei.<br>Dr. Hans Riepen. VIII, 90 S.   | 5,25              |
| 100. | <b>Die wissenschaftlichen Grundlagen der Preisbildung für die elektr. Arbeit.</b><br>Dr. W. Kummer. IV, 52 S., 18 Abb.   | 3,60              |
| 101. | <b>Bandenspektren auf experimenteller Grundlage.</b><br>Dr. Richard Ruedy. VI, 124 S., 62 Abb.   | 8,60              |
| 102. |  |                   |
| 103. | <b>Automobilschwingungslehre.</b><br>Dipl.-Ing. E. A. Wedemeyer. VI, 186 S., 89 Abb., 1 Ausschl.-Taf.  | 13,30             |
| 104. |  |                   |
| 105. | <b>Grundriß der kosmetischen Chemie.</b><br>Dr. Hans Truttwin. IV, 152 S.  | 8,75              |
| 106. |  |                   |
| 107. | <b>Elastische Messungen an Fichtenholz.</b><br>Dr.-Ing. Robert Schlüter. III, 56 S., 14 Abb.   | 3,60              |
| 108. | <b>Objektive Spektralphotometrie.</b><br>Dr. L. S. Ornstein, Dr. W. J. H. Moll und Dr. H. C. Burger. VI, 146 S., 75 Abb.   | 10,80             |
| 109. |  |                   |
| 110. | <b>Die elektrischen Leuchtröhren.</b> Mit einem Geleitwort von Dr. M. Pirani.<br>Walt. Köhler u. Rob. Rompe. VIII, 96 S., 60 Abb. u. 5 Tabellen.   | 6,80              |
| 111. | <b>Hochpolymere organische Naturstoffe.</b><br>Dr. Hansjürgen Saechtling. VI, 125 S., 26 Abb. u. 5 Tabellen.   | 8,—               |
| 112. | <b>Supraleitung.</b><br>Dr. Karl Steiner und Dr. Peter Grassmann. VIII, 140 S., 44 Abb.  | 9,60              |
| 113. | <b>Funknavigation in der Luftfahrt.</b><br>Prof. Dr.-Ing. Paul Freiherr von Handel und Dr. phil. Kurt Krüger. IV, 103 S., 73 Abb.  | 4,50              |
| 114. | <b>Elektrische Isolierstoffe. Ihr Verhalten auf Grund der Ionenadsorption an inneren Grenzflächen.</b><br>Prof. Dr.-Ing. Paul Böning. VI, 134 S., 94 Abb.  | 8,80              |
| 115. | <b>Optische Pyrometrie.</b><br>Prof. Dr. F. Hoffmann u. Dr. C. Tingwaldt. VII, 134 S., 49 Abb.   | 9,—               |
| 116. | <b>Grundzüge der Funkgeologie.</b><br>Ing. Dr. Volker Fritsch. VII, 121 S., 90 Abb.  | 9,—               |
| 117. | <b>Erzeugung von Atom- und Ionenstrahlen.</b><br>Dr. Hans Bomke. VI, 147 S., 37 Abb.   | 9,40              |
| 118. | <b>Transformatorenkurzschlüsse.</b><br>Prof. Dr. Milan Vidmar. VIII, 136 S., 40 Abb.   | 9,—               |
| 119. | <b>Statische Stabilität bei Drehstrom-Hochleistungsübertragung.</b><br>Prof. Dr.-Ing. Adolf Leonhard. VI, 135 S., 83 Abb.  | 9,—               |
| 120. | <b>Die Isolierstoffe elektr. Maschinen unter Berücksichtigung der Heimstoffe.</b><br>Prof. Dr.-Ing. Heinrich Hess. VII, 149 S., 45 Abb.  |                   |

Weitere Hefte in Vorbereitung