

Dielektrisches Material

Beeinflussung durch das elektrische Feld
Eigenschaften · Prüfung · Herstellung

Von

Dr.-Ing. A. Bültemann

Dresden

Mit 17 Textabbildungen



Berlin
Verlag von Julius Springer
1926

ISBN-13:978-3-642-89589-0 e-ISBN-13:978-3-642-91445-4
DOI: 10.1007/978-3-642-91445-4

Alle Rechte, insbesondere das der Übersetzung
in fremde Sprachen, vorbehalten.
Copyright 1926 by Julius Springer in Berlin.

Vorwort.

Beschreibungen von Herstellungsverfahren sind deshalb schwierig, weil sie nicht so lückenlos möglich sind, als wenn über Messungen berichtet wird. Eine selbst bis in die kleinsten Einzelheiten wiedergegebene Fabrikation ist nur in den seltensten Fällen ohne weiteres reproduzierbar, wenn es sich dabei um chemische Vorgänge handelt. Im besonderen kommt dieser Fall bei der gewerbsmäßigen Anfertigung elektrischer Isolierstoffe in Betracht.

Daß die Verhältnisse auf dem Gebiete der Dielektrika ungünstig liegen, ist allgemein anerkannt. A. Günther-Schulze spricht dies im Vorwort seines Buches: „Über die dielektrische Festigkeit“ 1924 bei Kösel & Pustet in München erschienen, aus, daß hier die Erforschung nicht annähernd in dem Maße fortgeschritten ist wie auf den anderen Gebieten der Elektrotechnik, und gibt als Grund dafür an, daß es kaum ein zweites Problem gibt, auf dem sich dem exakten Versuch derartig große und schwer zu überwindende Widerstände entgegenstellen.

Dieselbe Ansicht vertritt der langjährige Vorsitzende der Kommission für Isolierstoffe des Verbandes Deutscher Elektrotechniker E. Orlich auch und bemängelt in El. Be. 1923, S. 182, daß in den Kreisen der ernsten Fachleute noch immer nicht die grundlegende Wichtigkeit des ganzen Gebietes richtig bewertet wird. Nur durch die Mitarbeit zahlreicher Hilfskräfte und engste Zusammenarbeit von Wissenschaft und Praxis können die großen Aufgaben gelöst werden, die uns hier entscheidend vorwärtsbringen.

Bücher, welche die Fabrikation elektrischer Nichtleiter behandeln, gibt es kaum. Wer die vorliegende Schrift liest, wird feststellen, daß sich durch alle Seiten die Hauptfrage hindurchzieht, wie der Gehalt des Isolierstoffs an Wasser und Luft, den Körpern mit den am weitesten auseinanderliegenden Dielektrizitätskonstanten, die Eigenschaften des Nichtleiters im elektrischen Felde beeinflußt, und wie man auf Grund der bisher vorliegenden Forschungen und Erfahrungen vorzugehen hat, um ungünstige Wirkungen auszuschalten.

Während im allgemeinen infolge der großen stofflichen Verschiedenartigkeit der elektrischen Isoliermaterialien jeder Isoliertechniker sich vorzugsweise mit seinem eigenen Gebiet beschäftigt, ist hier versucht, alle Dielektrika vom gasförmigen über den flüssigen und plastischen bis zum festen daraufhin anzusehen, wie ihre chemische und physikalische Natur beschaffen ist, und was für Möglichkeiten es gibt, Erzeugnisse erhöhter elektrischer Festigkeit aus ihnen herzustellen. Dabei

ergibt sich ein Vorteil. Nämlich bei den wesensverschiedenen Nichtleitern treten die Erscheinungen, welche mit den dielektrischen Eigenschaften zusammenhängen, auch entsprechend verschieden stark oder schwach hervor. Infolgedessen entdeckt man Vorgänge, welche bei der Behandlung nur eines Isolierstoffes vielleicht noch längere Zeit unbemerkt geblieben wären.

Es gehört ein gewisser Mut dazu, sich unter den vorliegenden Verhältnissen in einem Buch mit der Fabrikation elektrischer Isolierstoffe zu befassen. Aber es deshalb überhaupt nicht zu wagen, an diese Aufgabe heranzugehen, wurde als durchaus falsch angesehen, weil die Elektrotechnik gebieterisch nach hochwertigen Nichtleitern verlangt. Außerdem werden sicher Fachleute auftreten, die sich mit den vielen Mängeln dieser Schrift befassen, so daß die Behandlung des Stoffes rühriger wird. Ein Vorteil von großer Bedeutung.

Sollte es später zu einer Neubearbeitung kommen, so wird dies hoffentlich zu einer besseren Darstellung führen. Auch die Bemühungen, für weitere namhafte Gruppen von Isolierstoffen Prüfungsvorschriften durch den VDE zu schaffen, sind zur Zeit noch in der Schwebe.

In dem vorliegenden Buch sind keine Rezepte gegeben. Vielmehr ist die Frage, wie man eine elektrische Festigkeit bei den mannigfaltigen Arten der Nichtleiter erreichen kann, generell behandelt, und es wurde der Nachweis versucht, daß überall trotz größter Unterschiede im chemischen Aufbau des Materials die Befolgung bestimmter Richtlinien zum Ziele führt. Die jeweiligen Maßnahmen hängen von den Ausgangsstoffen ab, sind also stark voneinander abweichend.

Die elektrischen Faserstoffe wurden im Hinblick ihres technischen und wirtschaftlichen Wertes besonders eingehend behandelt, auch deshalb, weil die Kommission für Isolierstoffe des VDE sich zur Zeit mit der Aufstellung von Prüfungsvorschriften beschäftigt, welche eine Unterkommission unter dem Vorsitz des Verfassers bearbeitet. Die hier gemachten Ausführungen können als Grundlage einer weiteren Erörterung dienen und werden diesen Zweck hoffentlich auch erfüllen.

Die Anforderungen an die Isolierstoffe steigern sich unaufhörlich. Man verlangt lebhaft nach Nichtleitern, welche den Höchstspannungen gewachsen sind. Die Schwierigkeiten, welche sich einer rationellen Fabrikation entgegenstellen, sind noch sehr groß, es ist aber die Annahme berechtigt, daß sich durch eine symbiotische Zusammenarbeit ein beschleunigter Schritt herbeiführen läßt.

Dresden, im Juni 1926.

Bültemann.

Inhaltsverzeichnis.

	Seite
I. Einleitung	1
II. Messungen an elektrischen Isolierstoffen	1
III. Anfertigung von Isolierstoffen im Fabrikationsverfahren.	2
IV. Vorbedingungen für rationelles Arbeiten in der elektrischen Isoliertechnik	3
V. Das Dielektrikum nach der Elektronentheorie	4
VI. Luftleerer Raum und Gase in dielektrischer Beziehung	6
VII. Flüssigkeiten in dielektrischer Beziehung	12
VIII. Kolloide und Suspensionen im elektrischen Feld	14
IX. Feste Körper in dielektrischer Beziehung	16
X. Experimentelle Ermittlungen zur Erzielung elektrischer Festigkeit bei Herstellung technischer Nichtleiter.	23
XI. Weitere Erörterungen über elektrische Festigkeit und Roh- stoffprüfungen	31
XII. Prüfvorschriften für Isolierstoffe	35
XIII. Die Imprägnierung der Faser	58
XIV. Das Verschmelzen der Faser	66
XV. Bindemittel und ihre Eigenschaften	72
XVI. Bakelite	79
XVII. Isolierende Öle	87
XVIII. Isolierende Lacke	107
XIX. Elektrische Ausgußmassen	114
XX. Ein deutscher Entwurf zur Prüfung imprägnierter und nicht- imprägnierter faseriger elektrischer Isolierstoffe.	117
XXI. Ein ausländischer Entwurf von Lieferungsbedingungen beim Bezug von isolierenden Geweben	123
XXII. Erklärungen zu den vorhergehenden Entwürfen zur Prüfung elektrischer Faserstoffe	129
XXIII. Anorganisches Isoliermaterial, vornehmlich Porzellan	131
XXIV. Schlußbetrachtungen	146
XXV. Literaturnachweis	151

I. Einleitung.

Die Entstehung dieses Buches hat folgenden Grund. Immer wieder gibt es technisch und nichttechnisch gebildete Leute, welche ohne genügende Spezialkenntnisse von alle dem, was bereits über elektrische Isolierstoffe vorliegt, sich mit der Herstellung dieser wichtigen Baustoffe der Elektrotechnik befassen.

Die Folge davon ist, daß — abgesehen von finanziellen Fehlschlägen der Unternehmer — alle möglichen Industrieerzeugnisse auf den Markt gelangen, welche sich nachher als minderwertig herausstellen, im Fall einer Verarbeitung Störungen in der Stromversorgung verursachen und die Verwendung der Elektrizität als einer unzuverlässigen Energieform in schlechten Ruf bringen.

Auf diese Verhältnisse ist schon mehrfach von zuständigen Fachleuten hingewiesen worden. Es scheint aber wenig genützt zu haben. Vielleicht hat es deshalb mehr Erfolg, wenn in allgemeinverständlicher Weise und in einer nicht zu breiten Form über dieses Gebiet zusammenfassend berichtet wird.

Damit diejenigen Interessenten, welche Einzelheiten zu wissen wünschen, bequem dazu Gelegenheit finden, wurde die vorhandene Literatur am Schluß des Buches namhaft gemacht.

Im übrigen ist versucht, Richtungen und Wege anzugeben, wie der Lösung dringlich gewordener Fragen bei der Fabrikation der jetzt in den Vordergrund tretenden Hoch- und Höchstspannungsisolierstoffe näherzukommen ist.

II. Messungen an elektrischen Isolierstoffen.

Über elektrische Isolierstoffe besitzen wir in neuester Zeit mehrere sehr gute zusammenfassende Darstellungen. Diese wertvollen Bücher behandeln die Nichtleiter vorzugsweise auf Grund der Prüfungen ihrer elektrischen Festigkeit, ihres Isoliervermögens, der Dielektrizitätskonstanten, ihrer dielektrischen Verluste, des Verhaltens gegen Frequenzen und sonstiger ihnen eigentümlichen elektrischen und mechanischen Eigenschaften. Ferner werden die Konstruktionsformen der Nichtleiter untersucht und festgestellt, wie die elektrischen Kräfte auf sie wirken.

Die Schwierigkeiten, welche sich bei der Behandlung dieser Fragen ergeben, sind außerordentlich große, was den Forschern, welche sich damit befassen, vollkommen bewußt ist. Daher entstehen oft Ergeb-

nisse, die untereinander stark abweichen. Teilweise kommen diese Unstimmigkeiten daher, daß die gesetzmäßigen Zusammenhänge nicht in genügender Weise bekannt sind.

Ein weiterer Grund ist aber darin zu suchen, daß wir nur wenige oder besser überhaupt keine Dielektrika besitzen, welche in ihrer Zusammensetzung so fehlerfrei sind, daß eine Störung der Messungen ausgeschlossen ist. Dabei ist zu beachten, daß die allergeringsten Mängel im Material zu den bedeutsamsten Abweichungen führen können und in vielen Fällen die Veranlassung zu einer gänzlichen Zerstörung der Isolation sind. Im Betrieb gefährden derartige Materialien naturgemäß die Sicherheit der Anlage.

Die Lösung des Problems der Durchschlagsfestigkeit wird in erheblicher Weise dadurch erschwert, daß es dem Versuchsansteller an einem ganz einheitlichen Material fehlt, an welchem er seine Untersuchungen vornehmen kann. Auch die für diese Zwecke herangezogenen Kristalle genügen den Anforderungen einer absolut gleichmäßigen Struktur nicht.

III. Anfertigung von Isolierstoffen im Fabrikationsverfahren.

Es ist im folgenden nicht beabsichtigt, über allgemeine Prüfungen an nichtleitenden Stoffen zu berichten oder neue gesetzmäßige Erscheinungen bei der Beanspruchung vorhandener Dielektrika herauszufinden oder besonders günstige Konstruktionen von Isolierstoffen zu ermitteln. Sondern es wird Stellung genommen zu Fragen, welche die Anfertigung technisch brauchbarer Isolierstoffe betreffen.

Stößt die physikalisch-elektrotechnische Behandlung der Nichtleiter schon auf beträchtliche Hindernisse, so kann dies von der chemisch-technologischen in noch höherem Maße gesagt werden. Auf diesem Gebiete steht uns zahlenmäßiges Material kaum zur Verfügung, Gesetzmäßigkeiten und Konstanten fehlen gänzlich. Wir sind bisher auch nicht in der Lage, auf Messungen fußend, die Ausgangsstoffe und deren Mengen für eine bestimmte Art von Isolierkörpern festzulegen, erst recht natürlich nicht vorher anzugeben, wie sich die dielektrischen Eigenschaften bei Änderung der Rohstoffe und Wechsel in deren Mengen gestalten. Wir wissen aber aus Erfahrung, daß sich sogar aus Leitern der Elektrizität technisch brauchbare isolierende Körper herstellen lassen, und daß eine Zusammensetzung von ausschließlich isolierenden Stoffen durchaus nicht ein Isolierkörper zu sein braucht. Letzteres kann zum Teil seinen Grund darin haben, daß unter dem Einfluß des elektrischen Feldes Zersetzungen stattfinden und durch diese die elektrische Festigkeit vernichtet wird. Oder daß bei starkabweichenden Dielektrizitätskonstanten etwa vorhandene Lufteinschlüsse im Material dielektrisch zu schwach werden und die Zerstörung des Nichtleiters frühzeitig herbeiführen.

IV. Vorbedingungen für rationelles Arbeiten in der elektrischen Isoliertechnik.

Elektrisch isolierende Stoffe brauchen wir in derselben Mannigfaltigkeit, wie die elektrischen Erzeugnisse voneinander verschieden sind, also in außerordentlich vielseitigen und wesensverschiedenen Arten. Wir sind genötigt, natürliche und künstliche, gasförmige, flüssige, nachgiebige, elastische, dehnbare und feste, wetterfeste, hochhitzebeständige, gießbare, anorganische und organische, keramische, unbearbeitbare gegebenenfalls mit Einpressung, bearbeitbare, fest mit Leitern verbundene, Schwachstrom-, Starkstrom- und Hochspannungs- sowie sonstige Nichtleiter zu verarbeiten, ganz wie es der jeweilige Verwendungszweck erforderlich macht.

Es ist leicht zu übersehen, daß eine umfassende chemische Kenntnis die Vorbedingung für diejenigen ist, welche die Fabrikation elektrischer Isolierstoffe übernehmen. Diese Auffassung besteht schon lange, sie wurde bereits anläßlich der Tagung der Amerikanischen Elektrochemischen Gesellschaft in New York im Jahre 1903 von Dr. M. v. Recklinghausen ausgesprochen in seinem Vortrag: Isoliermaterialien, ein Feld für den Chemiker¹⁾. Er sagt u. a. dabei, daß der Chemiker bedauerlicherweise nur eine geringe Würdigung für die enormen Werte besitzt, welche hier die chemische Arbeit für den Fortschritt der elektrotechnischen Industrie nach sich zieht. Von erstaunlichem Weitblick zeugt Recklinghausens damalige Forderung, baldmöglichst die Wärmefestigkeit der Isoliermaterialien zu erhöhen, die Feuchtigkeitsbeständigkeit der Nichtleiter zu vergrößern und die isolierenden Öle für die Elektrotechnik brauchbarer zu machen.

Ob die chemischen Kreise die Mahnung Recklinghausens im vollen Maße begriffen und vor allem beherzigt haben, soll unerörtert bleiben. Tatsache ist, daß die gewerbliche Herstellung der isolierenden Baustoffe hinter den Fortschritten der Elektrotechnik zurückgeblieben ist, und zwar ist dies nicht nur in Deutschland der Fall, sondern gleichermaßen in der alten wie in der neuen Welt.

Daß hierfür schwerwiegende Gründe vorhanden sein müssen, ist unabweisbar. Die Elektrotechnik darbt z. B. an betriebssicheren brauchbaren Nichtleitern einfacher Konstruktion für hohe Spannungen. Wir haben für die Verteilung der elektrischen Energie in Deutschland längst 200 kV überschritten, in Amerika ist man über 250 kV hinaus. Die Isolierung dieser Hochspannungsleitungen begegnet großen Schwierigkeiten. Daß bei wirtschaftlich derart wichtigen Anlagen bisher keine zweckmäßigere und billigere Lösung der Isolierung gefunden wurde, bezeugt die Hartnäckigkeit des Gegenstandes.

Vorher war gesagt, daß der Fabrikant von Isoliermaterial chemisch gebildet sein muß. Die hier vorliegenden Verhältnisse beweisen aber weiterhin, daß dies allein nicht genügt, wenn er bei der Beurteilung vieler hier auftretender Fragen oftmals nicht völlig hilflos dastehen

¹⁾ Electrical Review, Vol. 42, Nr. 19, 1903.

soll. Und zwar muß die Kenntnis der elektrischen Festigkeitslehre hinzukommen, ebenso ein Verständnis für allgemeine Belange der Elektrotechnik.

Die Kolloidchemie als moderner Bestandteil der physikalischen Chemie verhilft uns bei vielen isoliertechnischen Reaktionen zu bedeutungsvollen Aufschlüssen und Anregungen.

Längst haben die Chemiker die Unteilbarkeitslehre der Atome aufgegeben. Wir wissen heute, daß die Materie nichts anderes ist als eine Zusammensetzung atomarer Elektrizitätsquanten.

V. Das Dielektrikum nach der Elektronentheorie.

Faraday war der erste, welcher durch die Äquivalenzgesetze in der Elektrolyse gezeigt hat, daß Materie und elektrische Ladungen in funktionellem Zusammenhang stehen. Diese Erscheinungen werden später noch eingehend behandelt.

Das kleinste nicht mehr teilbare Elektrizitätsquantum ist das Elektron. Es hat negativen Charakter und kommt in- und außerhalb des Kernes von Atomen vor, ferner in negativen Ionen, sowie losgelöst als freies Elektron. Die Kathodenstrahlen und β -Strahlen sind derartige freie Elektronen. Auch von glühenden Metallen werden sie ausgesandt. Sie zeigen in allen Gasen ein ganz gleichmäßiges Verhalten, werden durch elektrische und magnetische Kräfte abgelenkt und durch diese in ihrer Geschwindigkeit beeinflußt. Da sie Trägheit besitzen, nehmen wir an, daß die Ladung an Masse geknüpft ist. Einem Mol Elektronen kommt das Gewicht von $\frac{1}{1830}$ g zu.

Der Elektronendurchmesser besitzt ungefähr den zehntausendsten Teil von dem Durchmesser des Atoms. Obwohl die Elektronenladung des Elektrons, welche Millikan gleich $4,77 \cdot 10^{-10}$ elektrostatische Einheiten ausgemessen hat, einen sehr kleinen Wert darstellt, so herrscht infolge der Winzigkeit des Elektrons auf seiner Oberfläche eine Energiedichte, welche die gewaltige Potentialdifferenz von 750 000 Volt ergibt.

Freie positive Elektrizitätsquanten kennen wir bisher nicht. Die positive Einheitsladung, welche denselben Wert wie das Elektron gleich $4,77 \cdot 10^{-10}$ elektrostatische Ladungen besitzt, ist an die kleinste Wasserstoffmasse gebunden. Ferner kommen positive Ladungen in Ionen vor.

Alle Atome derjenigen Stoffe, die wir als Elemente zu bezeichnen pflegen, sind aus positiven und negativen Elektrizitätsquanten aufgebaut. Im Innern eines solchen Atoms befindet sich eine sog. Kernladung. Sie besteht z. B. bei dem einfachsten Gebilde, dem Wasserstoffatom, aus einer an Masse gebundenen positiven Einheitsladung. Um diese kreist im Fall Wasserstoff ein Elektron auf einer ellipsoidähnlichen Fläche, indem die Coulombsche Anziehungskraft, entsprechend den elektrostatischen Ladungen, und die Zentrifugalkraft zu einem Gleichgewicht gelangen. Auf diese Weise bewegt sich das Elektron 6—7tausend billionenmal in der Sekunde um den Wasserstoffkern, den man auch Proton nennt. Denkt man sich einen Raum von ca. 10 m

Durchmesser, so würde im Verhältnis dazu das Proton nur ein Punkt darin sein. Das in mehreren Metern Abstand sich bewegende Elektron ist noch erheblich kleiner. Für die planetenartige Bewegung ist also Raum genug vorhanden.

Die übrigen Atome unterscheiden sich vom Wasserstoffatom dadurch, daß die Kernladung komplizierter und größer ist und außer positiven auch negative Elektrizitätsquanten enthalten kann, indem aber immer die positive Elektrizität einen Überschuß bildet. Dann wächst in entsprechender Weise die Zahl der kreisenden Elektronen, welche sich zu mehreren sowohl auf derselben Bahn als auch auf Bahnen bewegen, die einen weiteren Abstand vom Kern besitzen. Die Gesamtzahl der umlaufenden Elektronen ist gleich der Kernladungszahl. Man bezeichnet diese im periodischen System als Ordnungszahl.

Es kreisen somit im Wasserstoffatom 1 Elektron um einen Kern mit 1 positiven Ladung, im Kaliumatom 19 Elektronen auf 4 verschiedenen Bahnen um einen Kern, der 19 positive Ladungen besitzt, im Uranatom die bisher bekannte Höchstmenge von 92 Elektronen um einen Kern mit 92 Protonen, usw.

Da sich hier ausschließlich ganze Zahlen bei Wasserstoff als Einheit herausstellen, wird der Schluß gezogen, daß alle Atome aus Elektrizitätsquanten bestehen.

Das gesamte physikalische und chemische Verhalten der Atome ist von der Zahl der Elektronen und den Elektronenbahnen, welche rechnerischer Ermittlung zugänglich sind, abhängig. Die auf den äußeren Ellipsoiden kreisenden Elektronen sind leichter geneigt, das Atom zu verlassen wie die auf den inneren Bahnen, besonders dann, wenn sie dort nur in geringer Zahl vorhanden sind.

Verbinden sich mehrere Atome zu Molekülen, so springen ein oder mehrere Elektronen, welche die Wertigkeit des Atoms darstellen und daher Valenzelektronen genannt werden, in den Verband des zweiten Atoms über und bewegen sich dann, den früher genannten Gesetzen wieder folgend, um das Gesamtgebilde.

Ein Atom, das außer seiner Neutralität noch Elektronen aufgenommen hat, ist zu einem negativen Ion geworden. Im Gegensatz dazu ist ein positives Ion ein solches, welches elektronenärmer geworden ist. Die Ionen haben mit großer Annäherung die Masse des Atoms, die vom Atomkern ausgehenden positiven Elektrizitätsmengen verschwinden in den Elektronen.

Zu den Stoffen, die gern Elektronen abgeben, gehören die Metalle. Der Wirbel von abgestoßenen, wiederaufgenommenen und freien Elektronen wird in eine gleichmäßig fließende Bewegung gebracht, wenn ein elektrisches Potentialgefälle an das Metall gelegt wird. Es wirken in dem jetzt vorhandenen elektrischen Feld Kräfte auf die Elektronen. Die dann entstehende Elektrizitätsleitung im Metall, welche der Richtung der Feldstärke entgegengesetzt ist, ist die Bewegung der Leitungselektronen. Die Reaktionsgeschwindigkeit ist der angreifenden Kraft direkt und dem Reaktionswiderstand umgekehrt proportional, wir haben das Ohmsche Gesetz vor uns

$I = E/W$, wo I die Stromstärke, E die Spannung und W der Leitungswiderstand ist.

Der Widerstand stellt also eine Materialkonstante dar und ist der Ausdruck für die Zahl und die Bewegungen der Leitungselektronen.

Stoffe, welche auf Grund ihres atomaren Aufbaues nicht befähigt sind, Elektronen abzugeben, sind Nichtleiter des elektrischen Stromes. Wird ein solcher elektrischer Isolator in ein elektrisches Feld gebracht, so kommt daher kein Wandern von Elektronen, keine elektrische Strömung zustande.

Jedoch bleiben die elektrischen Kräfte nicht ohne eine das Atom verändernde Wirkung. Die vorhergehenden Ausführungen über die Atomstruktur haben uns erkennen lassen, daß sich die Elektronen mit großer Geschwindigkeit auf ellipsoidähnlichen Bahnen bewegen. Diese Elektronenbahnen erfahren im Nichtleiter-Masseteilchen unter dem Einfluß des elektrischen Feldes eine Deformation, welche durch ein Gleichgewicht zwischen der Zentrifugalkraft, der Coulombschen Anziehungskraft und der Feldstärke zustande kommt. Die Bahnverschiebung erfolgt in entgegengesetzter Richtung des Feldes, die äußeren Elektronenbahnen bestimmen fast ausschließlich den Wert dieser Abweichung. Der Betrag der Dielektrizitätskonstanten läßt sich hieraus errechnen.

Gänzlich ohne ein geringes Vorkommen von wanderungsfähigen Elektronen ist aber kein praktisch vorhandener nichtleitender Stoff. Deshalb ist stets ein, wenn auch oftmals nur unbedeutender Strom vorhanden, welcher sich dem gedachten Verschiebungsstrom überlagert.

Also auch die elektrische Festigkeit ist eine Materialkonstante wie die elektrische Leitfähigkeit. Bei einer bestimmten Höhe der elektrischen Belastung tritt ein Zerreißen des atomaren Gefüges ein, die Elektrizität wandert unter dem Druck der Potentialdifferenz als Elektronen und Ionen durch den Körper.

VI. Luftleerer Raum und Gase in dielektrischer Beziehung.

Im luftleeren Raum sind die Vorgänge beim Elektrizitätsdurchgang verhältnismäßig am leichtesten zu übersehen. Unter dem Einfluß der angelegten Spannung entsteht in Richtung des elektrischen Feldes ein Strom freier Elektronen, dessen Stärke sich durch die Anwendung von Glühkathoden steigern läßt.

Ist das Vakuum kein vollständiges und sind noch Gasspuren vorhanden, so stoßen Molekeln, Ionen und Elektronen aufeinander. Die Stöße erfolgen elastisch, d. h. ohne Energieänderung, wenn zwischen diesen verschiedenen Arten von Stoffteilchen keine Affinität vorhanden ist. Im anderen Fall, besonders bei erhöhter Feldstärke, kommt es zu chemischen Umwandlungen und als Folge davon zu Änderungen beim Elektrizitätstransport.

Die Zeit erfordern Änderung der Leitfähigkeit von Gasen, welche Spuren von Molekeln mit Elektronenaffinität enthalten, hat zu einer quantitativen Bestimmung von geringfügigen Sauerstoffmengen geführt

(tausendstel bis hunderttausendstel Prozenten), welche sich in einem indifferenten Gase, z. B. in Stickstoff, befinden. M. Pirani und E. Lax¹⁾ legten bei 760 mm Hg-Druck unter Benutzung einer Aluminiumscheibe von 30 mm Durchmesser und einer Molybdänspitze in 50 mm Entfernung als Elektroden 5000 V Wechselstrom von 50 Per an. Aus den Leitungskurven des gleichgerichteten Stroms, welchen Stromstärken in der Größenordnung von 10^{-4} A entsprechen, läßt sich der Gehalt an Sauerstoff entnehmen.

Wird im Atom ein Elektron auf eine weiter auswärts kreisende Bahn getrieben, so geschieht dies mit geringerem Aufwand an Energie, als wenn das Elektron vom Atom ganz fortfliegt, also aus dem Atomverband ausscheidet und mit einer Molekel ein Ion bildet. Die unter erhöhtem Potential zustande kommenden Beschleunigungen und Stöße der Molekeln und Ionen der stofflichen Bestandteile sowie der Elektronen führen zu komplizierten Reaktionen, welche eine quantitative Verfolgung der Einzelprozesse schwierig gestalten.

Von den gasförmigen Isolierstoffen ist technisch der wichtigste die Luft. Bei den weitaus meisten elektrischen Vorgängen dient die Luft als Isolator. Aus diesem Grunde ist die Kenntnis ihrer Zusammensetzung und ihrer dielektrischen Eigenschaften eine Notwendigkeit.

Die Luft ist kein Element, sondern ein Gemisch aus einer ganzen Anzahl verschiedener Stoffe. Sie zeigt in ihrer Zusammensetzung eine große Konstanz in den Bestandteilen und eine sehr gleichmäßige Verteilung, weil es das Bestreben der Gasmolekeln ist, sich durch ihre lebhafteste Bewegung und ihre unbegrenzte Ausbreitungsmöglichkeit in vollendeter Weise zu mischen. Der Gehalt an Wasserdampf ist jedoch größeren Schwankungen ausgesetzt.

Der Hauptbestandteil der Luft ist Stickstoff. In trockenem Zustande beträgt der Gehalt bei 760 mm Barometerstand rund 75 Gewichtsprozent. Ferner enthält Luft rund 23 vH Sauerstoff, 1,3 vH Argon und Spuren von Kohlendioxyd, Ammoniumnitrit, Ammoniumnitrat, Helium, Neon, Krypton, Xenon, Ozon, Methan sowie geringe organische und anorganische Verunreinigungen. In 1 cbm Luft wurden an den wenig reaktionsfähigen seltenen Edelgasen ermittelt an Neon 0,01339 g, an Helium 0,00027 g, an Krypton 0,00018 g und an Xenon 0,00003 g. Der Wasserdampf macht im Durchschnitt 1,3 Volumprozent oder 0,84 Gewichtsprozent aus. Da die Dichte des Wasserdampfes nur 0,62 beträgt, ist feuchte Luft leichter als trockene. Die Menge an Wasserdampf, welche sich in der Luft befindet, hängt von der Temperatur ab. Die Verdunstung des Wassers findet aber nicht nur beim Siedegrad statt, sondern bei allen Temperaturen. So entspricht die Tension bei -20° C 0,93 mm Quecksilberhöhe, bei -10° 2,15 mm, bei 0° 4,6 mm, bei 15° 12,7 mm, bei 20° 17,4 mm, bei 40° 54,9 mm, bei 60° 148,9 mm, bei 80° 355,4 mm, bei 100° 760 mm.

Bei 25° C sind in 1 cbm völlig mit Wasserdampf gesättigter Luft bei 760 mm Quecksilberhöhe 22,5 g Wasser enthalten, von denen sich

¹⁾ Wissenschaftl. Veröffentlichungen aus dem Siemenskonzern Bd. 1, Heft 1.

bei 0° 17,1 g Flüssigkeit niederschlagen. Dehnt sich die mit Wasserdampf gesättigte Luft aus, so sinkt naturgemäß die Temperatur. Es scheiden sich an den in der Luft vorhandenen Staubteilchen Wassernebel aus, ebenso wirken infolge des Auftretens dielektrischer Kräfte die Ionen als Kondensationskerne.

Die Permeabilität von Luft ist sehr groß, was isoliertechnisch von erheblicher Bedeutung ist, weil poröse Nichtleiter, z. B. die Faserstoffe, im nicht oder nicht hinreichend imprägnierten Zustande bis ins Innerste luftdurchsetzt sind. Wird an einen lufthaltigen Isolierstoff elektrische Spannung angelegt, so wirkt das Feld stark auf die Luftblasen ein und führt eine Umsetzung in aktiven Sauerstoff (Ozon) und Salpetersäure herbei, falls das Potentialgefälle nicht wesentlich unter dem sichtbaren Ionisationspunkt bleibt. Die Größe der Lufteinschlüsse, der Druck, die Temperatur und die Art, wie das elektrische Feld, z. B. durch Spitzenwirkung der Fäserchen, im Körperinneren sich betätigt, spielen hier eine große Rolle. Ein Spannungsgradient von etwa 1000—3000 V/mm bewirkt die Dissoziation der Luft und führt zur Bildung der äußerst reaktionsfähigen Sauerstoff- und Sauerstoff-Stickstoffverbindungen, welche die Zerstörung des Nichtleiters herbeiführen.

Im normalen Zustand ist die Luft wenig dissoziiert, die Leitungsträger sind auch bei den höchsten bisher festgestellten Spaltungen nur in verschwindenden Mengen gegenüber den neutralen Molekeln vorhanden. Immerhin ist eine geringe Leitfähigkeit ohne weiteres nachzuweisen, indem ein auf isolierter Grundlage aufgestelltes Elektroskop sich allmählich durch die in der Luft befindlichen Ionen entladet.

Wenn auch durch Staub oder durch die Apparatur Isolationsfehler entstehen können, ist erwiesen, daß ein bestimmter Teil der Ableitung durch die in der Luft vorhandenen Ionen hervorgerufen wird. Filtriert man die Luft durch Glaswolle, Wasser, enge Metallrohre oder ein starkes elektrisches Feld, hat sie ihre Leitfähigkeit verloren. Lufträume, die abgeschlossen gehalten werden, wie dies in Isolierstoffen vorkommt, zeigen einen erheblich größeren Ionenbestand, welcher durch die Einwirkung der Wände veranlaßt wird.

Eine Bestrahlung der Luft mit ultravioletem Licht, Röntgenstrahlen oder radioaktiven Stoffen vermehrt die Spaltung und steigert den Elektrizitätstransport.

Legt man an Gase, z. B. an Luft, eine elektrische Spannung an, so zeigt sich unabhängig von der Größe der letzteren zunächst nur eine sehr geringe Leitfähigkeit. Selbstverständlich dürfen die Potentialdifferenzen nicht die Höhe erreichen, bei welcher Entladungen beginnen. Anfänglich wird das Ohmsche Gesetz erfüllt, aber bald bleibt der Strom hinter der angelegten Potentialdifferenz zurück, so daß eine Sättigung eintritt und ein weiteres Ansteigen der Stromstärke aufhört. Erst dann, wenn das elektrische Feld so stark ist, daß Ionisation einsetzt, also in Luft von 760 mm Hg-Druck bei ungefähr 29000 V/cm oder in evakuierter Luft von 1 mm Hg-Druck bei 40 V/cm wächst die Stromstärke rapide. Bei erhöhter Spannung kommt es dann zum Glimmen und zur Zerstörung der Isolation. Den Knick der Kurve

bezeichnet man als Anfangsspannung oder Funkenpotential, dann setzt die Büschelentladung und zum Schluß der Büschellichtbogen ein. Unter der Wirkung der gesteigerten Spannung wird den zunächst in geringer Zahl vorhandenen Elektronen eine verstärkte Bewegungsenergie zuteil, sie prallen gegen die Gasmolekeln und führen sie durch den Anprall in Ionen über. Diese Ionen beteiligen sich unter dem Einfluß des elektrischen Feldes ihrerseits dann ebenfalls an der Hervorbringung neuer Ionen, so daß schließlich ein durch die angelegte Potentialdifferenz bedingtes Gleichgewicht und eine entsprechende Stromüberführung zustande kommt. Bei der hohen Hitze, welche im Durchschlagskanal herrscht, vereinigen sich Sauerstoff und Stickstoff zu Nitroverbindungen. Die Umsetzungen, welche hier entstehen, sind abhängig von der chemischen Affinität, also der Atom- und Molekularstruktur, und dem Mengenverhältnis der verschiedenen Moleküle, Ionen und Elektronen.

Untersuchungen über die elektrische Festigkeit der Luft besitzen wir in großer Menge. Sie sind keineswegs einfach, was aus der Streuung der gefundenen Werte hervorgeht. Von maßgeblichem Einfluß sind die Formen der Elektroden, z. B. ob diese aus Spitzen, Platten, Kugeln, Zylindern oder anderen Formen bestehen. Je größer die vom Schließungsfunken zu überbrückende Luftstrecke ist, um so geringer pro Zentimeter ist die elektrische Festigkeit. In sehr dünnen Schichten haben wir elektrische Festigkeiten, welche auf das homogene Feld umgerechnet, Millionen von V/cm betragen. Luft hält bei größeren Schlagweiten ungefähr 30000 V/cm aus.

Selbst zwischen ebenen Platten im scheinbar ganz homogenen Felde schwanken die von den Versuchsanstellern gefundenen Werte bis zu 50 vH. Am eindeutigsten fallen die Festigkeitsbestimmungen unter Benutzung coaxialer Zylinder als Elektroden auf, weshalb Meßfunkenstrecken unter diesen Bedingungen bevorzugt sind.

Die geringsten Unebenheiten an den Elektroden machen die Stromleitung veränderlich, vor allem Spitzenbildungen. Auch das Elektrodenmaterial, welches aus nichtleitenden Stoffen bestehen kann, hat auf die Durchschlagsversuche Einfluß. Vielfach bilden sich Oxyde, welche die Resultate ungleichmäßig gestalten. Auch wandert Feuchtigkeit an die Kathode und legt eine Wasserhaut herum.

Frequenzen beeinflussen den Durchgang der Elektrizität durch Gase nicht.

Haben wir es mit Lufteinschlüssen in faserigen und anderen Dielektriken zu tun, so pflegt durch die auftretende Joulesche Wärme und durch Wärme infolge dielektrischer Verluste das im Isolierkörper enthaltene Wasser chemisch wirksam zu werden und teilweise in den Gaszustand überzugehen, so daß die Ionisation noch unter günstigeren Verhältnissen verläuft. Durch Temperaturzunahme wird die Zerstörung der isolierenden Eigenschaften von Luft beschleunigt, es tritt in Folge Wärmeentwicklung zusätzliche Ionenbildung auf.

Werden die Gase durch hohen Druck auf ein kleines Volumen zusammengedrückt, führt dies zu inneren Reibungswiderständen, welche

die Ionen- und Elektronenbildung und ihre Geschwindigkeiten stark herabdrücken. Die elektrische Festigkeit steigt annähernd proportional mit dem Gasdruck. Man kann also bei einem Gas, welches auf $\frac{1}{10}$ seines früheren Raumes zusammengepreßt ist, die Durchschlagsfestigkeit auf ungefähr den zehnfachen Wert erhöhen. Derartige komprimierte Luft-, Kohlensäure- und Stickstoffgase benutzt man deshalb u. a. zum Füllen der inneren Teile von Hochspannungsdurchführungen, wobei noch der Vorteil besteht, daß die Dielektrizitätskonstante den niedrigen Wert von 1 beibehält.

Der gegenteilige Fall, ein Nachlassen der elektrischen Festigkeit der Luft, macht sich im Leitungsbau unangenehm bemerkbar. Werden nämlich die Leitungen bis zur Zulässigkeit durch Spannung belastet und bei gleicher Entfernung von einander an Orte niedrigen Barometerstandes geführt, z. B. über eine Gebirgsgegend, so treten die sog. Koronarscheinungen auf, d. h. es entladen sich Elektrodenströme und bringen die Lufthüllen in der Umgebung der Leitungsdrähte zum Glimmen. Wir haben es hier mit einem unvollkommenen Durchschlag der Luft zu tun, hervorgerufen durch die zylindrische Form der Elektroden, also der unter Spannung stehenden Kupferdrähte. An Stellen, wo die Drähte durch scharfkantige Risse beschädigt sind oder durch Verunreinigungen, wie Schnee, Ruß u. a., eine ungleichmäßige Oberfläche besitzen, ist die Glimmerscheinung infolge gesteigerter Felddichte naturgemäß größer. Die Koronaverluste der Luftisolation können derart groß werden, daß dadurch die Wirtschaftlichkeit der Stromversorgung in Frage gestellt wird.

F. W. Lee und B. Kurrelmeyer¹⁾ haben Untersuchungen der durch Gleichstrom unter vermindertem Druck entstehenden Koronarscheinungen in Luft, Sauerstoff, Stickstoff, Kohlensäure, Helium und Wasserstoff vorgenommen, indem die eine Elektrode ein vergoldeter Eisendraht von 0,066 cm Durchmesser war, welcher von einem Messingzylinder von 9,5 cm Durchmesser als Gegenelektrode eingehüllt wird. Die genannten Gase weichen teilweise in ihrem Verhalten stark voneinander ab. So tritt bei Helium unter 25 cm Hg-Druck schon bei 13 kV/cm an der Drahtoberfläche ein gelbliches Glimmen auf, dagegen in Kohlensäure eine mehr rot gefärbte Leuchterscheinung erst bei 50 kV/cm. Im Zwischenraum von 26 kV/cm bis 43 kV/cm liegen bei diesem Druck die sichtbaren Entladungen von Wasserstoff, Sauerstoff, Luft und Stickstoff. Dem Nullpunkt des Drucks streben die Kurven der Feldstärken annähernd linear zu.

Bei den vorliegenden Messungen zeigt sich, daß die Polarität eine Rolle spielt. Ist bei niedrigen Drucken der Draht mit dem positiven Pol der Stromquelle verbunden, also die Sammelstelle der Elektronen und negativen Ionen, erfolgt ein langsames Ansteigen der Stromstärke, als wenn er negativ ist, d. h. die positiven Ionen heranzieht. Auch in den Leuchterscheinungen ergeben sich hinsichtlich der Polarität Unterschiede, desgleichen entstehen bei jedem Gase zwei verschiedene, wenn

¹⁾ J. Am. Inst. El. Eng. 1925 Heft 1.

auch nicht gerade weit auseinanderliegende, Kurven der Koronafeldstärken, je nachdem ob die Drahtelektrode positiv oder negativ aufgeladen wurde. Es war natürlich dafür Sorge getragen, daß vor jeder neuen Messung die Drahtoberfläche gereinigt wurde, um unkontrollierbare Störungen auszuschalten. Nicht außer Betracht darf aber gelassen werden, daß die untersuchten Gase nicht absolut chemisch rein waren, sondern kleine Beimengungen enthielten. Inwieweit dies den Verlauf der Prozesse beeinflußt, läßt sich nicht ohne weiteres schätzen.

An Porzellanhängeketten kann die Erscheinung des unvollkommenen Durchschlags der Luft, besonders unter feuchten Verhältnissen, auch auftreten. Hier bildet dann die glimmende Hülle einen Schutz gegen den Überschlag, denn es stellt sich eine günstigere Spannungsverteilung auf der Kette ein. Die Überschlagsneigung wird vermindert.

Entscheidend für den Durchbruch der Nichtleiter ist der Scheitelwert der Spannung, bei sinusförmigem Wechselstrom hat man daher mit $\sqrt{2}$ zu multiplizieren.

Bei den Messungen der elektrischen Festigkeit von Luft findet man, daß der Durchschlagsfunke nicht bei dem dazugehörigen Potentialgefälle überzugehen pflegt, sondern daß eine erheblich höhere, mitunter doppelte Spannung erforderlich ist.

Diese Erscheinung der verzögerten Ladung kommt daher, daß anfänglich noch nicht diejenige Anzahl von freien Elektronen und Ionen vorhanden ist, welche den Durchschlag sofort einleitet. Deshalb macht sich zunächst ein erhöhtes Potential notwendig. Man kann die Verzögerung der Ionisation durch Bestrahlung der zu durchschlagenden Luftstrecke mit radioaktiven Stoffen vermindern.

Für die zahlenmäßig ausdrückbare Kennzeichnung des spezifischen Fassungsvermögens der isolierenden Stoffe für die Elektrizität, also für das Verhältnis der darin enthaltenen Elektrizitätsmenge zu der aufgedrückten Spannung, ist die Luft, genauer der luftleere Raum, als Einheit gewählt worden. In Luft befindet sich im Verhältnis zum Potentialgefälle die kleinste Elektrizitätsmenge, daher ist die Luft auch am stärksten beansprucht.

Da die Luft unterhalb der Durchbruchspannung sich von allen Stoffen am verlustlosesten erweist, werden Vergleichskondensatoren mit Luft als Dielektrikum für die Messung der kleinsten Verlustwinkel benutzt.

Beim Coulombschen Anziehungsgesetz ist durch die Zahl der Dielektrizitätskonstanten zu dividieren, wenn die auf einander wirkenden Elektrizitätsmengen nicht in Luft eingebettet sind, sondern in anderen Stoffen. Die Anziehungskraft im Wasser beträgt z. B. nur $\frac{1}{84}$ von dem Wert, welchen sie in einer Luftatmosphäre besitzt, da die Verschiebbarkeit (Dielektrizitätskonstante) des Wassers 84 mal so groß ist als die der Luft.

VII. Flüssigkeiten in dielektrischer Beziehung.

Der Elektrizitätsdurchgang durch flüssige Stoffe besitzt Unterschiede und Ähnlichkeiten mit dem, wie er sich in Gasen abspielt.

Gleich ist bei den beiden Aggregatzuständen, daß ein Rückstandsstrom nach Ausschaltung der angelegten Potentialdifferenz nicht in Erscheinung tritt, wenigstens bei solchen Gasen und Flüssigkeiten nicht, die gut durchgemischt sind.

Ausgußmassen zeigen im flüssigen Zustand unter Spannung nur Stromwärmeverluste, im festgewordenen Aggregatzustand kommen noch dielektrische Verluste hinzu.

Im Gegensatz zum Verhalten der Gase bringt die Stromleitung in Flüssigkeiten eine Erwärmung hervor, welche in ihrem Verlauf durch das Joulesche Gesetz bestimmt wird.

Von den Gasen nimmt die Luft in isoliertechnischer Beziehung das größte Interesse in Anspruch, von den Flüssigkeiten das Wasser. Während die Gase die niedrigste Dielektrizitätskonstante = 1 aufweisen, besitzt Wasser die höchste = 84. Infolgedessen ist das Wasser befähigt, auf gelöste Stoffe eine starke dissoziierende Kraft auszuüben.

Eine mehratomige Molekel begibt sich in der Weise in den dissoziierten, d. h. Ionenzustand, indem das Atom mit den kleinsten Masse-Teilchen der Elektrizität, den Elektronen, eine chemische Bindung eingeht. Aus der neutralen Molekel entstehen durch den Lösungsvorgang auf diese Art 2 Ionen mit entgegengesetzten Ladungen, es bleiben aber auch nichtdissoziierte Molekeln des gelösten Stoffes neben den positiven und negativen Ionen bestehen.

Die Kraft, welche den festen Körper in das Lösungsmittel hineintreibt, nennt man den Lösungsdruck. Die Menge der gelösten Molekeln bestimmt den osmotischen Druck. Lösungsdruck und osmotischer Druck, welcher ähnlich wie bei den Gasen die Molekeln auseinander zu treiben und die Flüssigkeit zu verdünnen sucht, wirken gegeneinander. Sinkt der Lösungsdruck unter den osmotischen Druck, z. B. durch zunehmende Konzentration der gelösten Molekeln, ist dieser bestrebt, gelöste Körper in fester Form auszuscheiden.

Reines Wasser zeigt, wie alle Stoffe, die besonders einheitlicher Natur und frei von verunreinigenden Spuren sind, eine starke Abneigung, sich zu dissoziieren. Experimentelle Untersuchungen haben ergeben, daß die Leitfähigkeit von Wasser, ebenso von konz. Schwefelsäure, konz. Flußsäure, kristallisierten Salzen, u. a. sehr niedrig ist und um so tiefer herabgeht, je mehr diese Stoffe von Beimengungen befreit werden.

Ganz ohne Vorhandensein von kleinen Mengen positiver Wasserstoffionen und negativer Hydroxylionen ist selbst das reinste Wasser nicht. Auch absorbierte Luft erhöht die Dissoziation.

Von allen Ionen wandern die des Wassers am schnellsten, die Geschwindigkeiten drückt man in reziproken Ohm aus.

Die Temperatur spielt bei der Spaltung in Lösung gehender Körper eine große Rolle. Je höher sie ansteigt, um so beweglicher werden die

Ionen und um so größer ihre Zahl. Bei dem Metall ist es bekanntlich umgekehrt. Dort wird die Freiheit der Elektrizitätsträger bei steigender Temperatur gehemmt, so daß in der Kälte eine vermehrte Strömung stattfindet.

Bringt man ein Potentialgefälle unter Benutzung von metallischen Elektroden in Berührung mit einer Flüssigkeit, so wandert vom positiven Pol aus unter dem Druck der aufgewendeten Spannungsenergie positive Elektrizität, gebunden an positive Ionen, an die Kathode und gibt hier die Elektrizitätsladung ab, indem dann zugleich der Rest des Ions in den Elementarzustand zurückkehrt. In gleicher Weise begeben sich vom negativen Pol aus negative Ionen an die Anode, übermitteln ebenfalls die Elektronen der Elektrode und hinterlassen den übrigen Bestandteil des Ions im Elementarzustand. Dabei pflegt die Flüssigkeit durch Joulesche Wärme in vielen Fällen erheblich an Temperatur zuzunehmen.

Je nach den chemischen Verwandtschaften der an dem Elektrizitätsdurchgang beteiligten Stoffe reagieren diese direkt oder sekundär aufeinander. Nähere Auskunft über die sich hier abspielenden Prozesse gibt die Lehre von der Elektrochemie.

Wie sehr chemische Stoffatome und Elektrizitätsatome miteinander innerlich verknüpft sind, beweist die Gesetzmäßigkeit, daß zwischen Strommengen und abgeschiedenen Stoffen Verhältnismäßigkeit besteht, und daß jedwedes Grammatom eines beliebigen Stoffes die gleiche Elektrizitätsmenge, nämlich 96540 Coulomb überführt und an die Elektroden abgibt. Man nennt diesen Wert, welcher 26,86 Amp.-Stunden entspricht, das elektrochemische Äquivalent. In 1 Amp. Stunde werden daher 0,2983 g Sauerstoff bzw. 0,0375 g Wasserstoff entladen. Die Erkenntnisse dieser engen Beziehungen zwischen Stoff und Elektrizitätsatom verdanken wir Faradays Arbeiten.

Wie groß sich die Menge der Elektrizität beläuft, welche durch eine Flüssigkeit hindurchgegangen ist, läßt sich auf leichte Weise durch Wägen der Elektroden des Coulometers oder auch gasanalytisch feststellen.

Die Wege, welche die Verbindung von Spaltprodukten und Elektrizitätsmassenteilchen wählen, um im Elektrolyten den Elektrizitätstransport vorzunehmen, führen nicht sämtlich in gerader Richtung auf kürzestem Wege von Elektrode zu Elektrode. Überall in der Flüssigkeit lassen sich Wanderungen feststellen. Am wenigsten dicht ist die Abgabe von Ladungen in der Mitte der Rückwand von Elektroden. Der Widerstand, welcher beim Elektrizitätstransport zu überwinden ist, hängt ab von der Entfernung der Elektroden, deren Fläche, der Ionenkonzentration und, wie schon hervorgehoben wurde, von der Temperatur. Erhöhter Druck erniedrigt die Leitfähigkeit.

Um einen Begriff von den hier vorliegenden elektrischen Widerständen zu geben, diene die Angabe, daß dieser bei einem gutleitenden Elektrolytwürfel bei 40° C unter Anwendung von Elektroden, die 1 cm hoch und 1 cm breit sind, ungefähr 1 Ohm beträgt. Man hat bei solchen Messungen, um die dem Strom entgegengesetzt wirkende Polarisierung auszuschalten, Wechselstrom statt Gleichstrom zu benutzen.

Tritt an Stelle von Wasser ein anderes Lösungsmittel, z. B. ein solches organischer Natur, pflegt das elektrische Leitvermögen stark herabzugehen, so bei den flüssigen Kohlenwasserstoffen und ihren Halogenverbindungen, Paraffinen, Ölen, Nitroverbindungen u. a.

Auf das Verhalten der Öle wird später noch besonders eingegangen, da sie isoliertechnisch von großer Wichtigkeit sind.

Anorganische Säuren, z. B. Chlorwasserstoff, verlieren ihre Dissoziierungsfähigkeit, wenn sie in Benzol, Toluol, Chloroform u. dgl. eingeleitet werden. Der für die elektrische Isolation gefährlichste Bestandteil ist unter allen Umständen das Wasser.

Das Durchschlagen von flüssigen Nichtleitern ist wenig geklärt, die hierbei festgestellten Ergebnisse weichen stark voneinander ab. Zweifellos liegt diese Erscheinung mit an der Art der Elektroden, deren Veränderung durch Benetzung mit Stoffen, welche in der Flüssigkeit enthalten sind, an den Temperaturen und an Zersetzungen, die das elektrische Feld hervorruft. Ionenwanderungen sind mit Bestimmtheit vorhanden. Diese lösen Wirkungen aus, welche den Durchschlag verzögern bzw. beschleunigen. Selbst in Flüssigkeiten, welche einer sehr sorgfältigen Behandlung unterzogen sind, befinden sich stets Spuren von Luft und Wasser.

Infolge starker Ionenreibung findet ein Anwachsen der Durchschlagsfestigkeit statt, wenn die Frequenz steigt.

VIII. Kolloide und Suspensionen im elektrischen Feld.

Zwischen Lösungen und festen Körpern gibt es eine Zwischenstufe, die Suspensionen und scheinbaren Lösungen. Das Untersuchungsmaterial, welches über dieses Gebiet aussagt, ist immer beachtlicher geworden und hat zu technisch bedeutsamen Aufschlüssen geführt. Auch die Industrie der elektrischen Isolierstoffe wendet mit großem Nutzen die Lehren und Gesetzmäßigkeiten an, welche sich hier ergeben haben.

Viele Körper von organischem und anorganischem Aufbau, die zu den besten Nichtleitern zählen und für gewöhnlich unlöslich sind, lassen sich durch Zerstäuben, durch elektrische, mechanische und chemische Einwirkungen in einen Zustand bringen, welchen man nach den bei Leim festgestellten Erscheinungen als kolloidal bezeichnet. Ihre Eigenschaften bestehen äußerlich darin, daß die Stoffe in diesem kolloidalen Zustand eine außerordentlich feine Verteilung besitzen, also über eine sehr große Oberfläche im Verhältnis zur Masse verfügen. Die Untersuchung des kolloidalen Zustandes bedeutet daher das Studium der Oberflächenenergie.

Man nennt die Lösung das Dispersionsmittel und den darin gelösten kolloidalen Stoff die disperse Phase. Solche disperse Systeme bestehen u. a. zwischen einem Gas und einer Flüssigkeit, einer Flüssigkeit und einem festen Körper, zwischen zwei Gasen, zwischen zwei Flüssigkeiten usw. Viele Körper, wie z. B. Gummi, Harze, Kohlenwasserstoffe, also praktisch sehr wertvolle Nichtleiter und Bestandteile

solcher, sind ausschließlich als Kolloide bekannt, andere Stoffe besitzen die Fähigkeit, kolloidal und kristalloidal in Lösung zu gehen. Zwischen Kolloid- und Kristalloidflüssigkeiten besteht der Unterschied, daß bei ersteren, welche ein ungewöhnlich großes Molekulargewicht haben, sich kaum ein osmotischer Druck geltend macht. Es lassen sich daher durch Dialyse die kolloidalen Lösungen rein herstellen. Auch optisch ist der Beweis für den kolloidalen Zustand der Stoffe zu erbringen.

Die Oberflächenspannung kann man z. B. durch Messung der kapillaren Steighöhe ermitteln, oder auch nach der Tropfenmethode. Ein Tropfen reißt ab, wenn sein Gewicht gleich dem Produkt aus der Oberflächenspannung und dem Umfang der Tropfenbasis ist. Die Oberflächenspannung gegenüber festen Körpern stellt man z. B. mittels der Mohrschen Wage nach Wilhelmy fest. Siehe Holde, Untersuchungen usw., und Kohlrausch, Prakt. Phys.

Während der Name „Suspension“ für neutrale in Flüssigkeiten schwimmende Körper, die sich allmählich zu Boden senken, gebraucht werden soll, denkt man sich kolloidal gelöste Stoffe als ein Gemengsel von neutralen Molekeln und Ionen. In den kolloidalen Stoffen befinden sich also Elektrizitätsträger. Durch Adhäsion und Kapillarität ist bei ihnen die Neigung vorhanden, in den festen Zustand überzugehen. Die gleichartigen Ladungen der Ionen wirken diesem Bestreben elektrostatisch entgegen, so daß sich die kolloidale Lösung als Gleichgewicht einstellt.

Schon 1861 hatte Quincke gefunden, daß Suspensionen unter dem Druck des elektrischen Feldes sich von Elektrode zu Elektrode bewegen, d. h. den Transport der Elektrizität ermöglichen. Viel später wurde erkannt, daß die Kolloide ebenfalls hierzu befähigt sind. Sie scheiden sich in den verschiedensten Formen ab, auch als Pulver und Gallerte.

Nach den vorhergehenden Erklärungen ist leicht einzusehen, daß das elektrostatische Feld der kolloidgelösten Stoffe leicht zu stören ist, wenn freie Ionen zugeführt werden. Je nach dem Grade, wie die disperse Phase an ihrer Oberfläche eine „Adsorption“ erleidet, findet eine mehr oder weniger starke Ausfällung statt, die mehr oder weniger Elektrolytteile enthalten kann. So kann sich sogar bei der Adsorption eine Umkehrung der Polarität vollziehen. Die positiven Wasserstoffionen und die negativen Hydroxyionen zeichnen sich durch eine große fallende Kraft aus, β -Strahlen bringen positiv geladene Kolloide zur Abscheidung.

Bei den Prozessen, wo unter einem angelegten Potentialgefälle Suspensionen und kolloidal gelöste Teilchen Träger und Brücken für die Elektrizität sind, wurde festgestellt, daß die Faradayschen Gesetze außer Kraft treten, die Elektrizitätsträger in wesentlich höherem Maße wie dort befördert werden und hohe Spannung bei geringer Entfernung der Elektroden die Wanderungen begünstigt. Dabei laden sich die Stoffe von hoher Dielektrizitätskonstante in Berührung mit solchen von niedrigerer positiv. Wasser als Dispersionsmittel hat die größte Dielektrizitätskonstante von 84 und begibt sich an die negative Elektrode.

In technischen Nichtleitern können unter elektrischem Potentialgefälle Bedingungen vorhanden sein, welche die Veranlassung sind, daß durch die Reaktionen der suspendierbaren und kolloidalen Stoffe das Dielektrikum zerstört wird. Oft spielen sich diese Vorgänge äußerst langsam ab, in anderen Fällen sehr schnell. Nebenher verlaufen im allgemeinen noch elektrolytische Wanderungen.

IX. Feste Körper in dielektrischer Beziehung.

Der Transport der Elektrizitätsmasseteilchen in Flüssigkeiten gestaltet sich, wie aus den vorigen Ausführungen ersichtlich ist, vielseitiger, wie er in Gasen verläuft, obwohl zwischen Flüssigkeits- und Gasdurchgängen doch mancherlei Ähnlichkeiten bestehen, wie z. B. die gasförmigen Entladungen.

Bei der elektrischen Durchdringung von festen Körpern treten weitere Mannigfaltigkeiten hinzu. Gerade in neuester Zeit hat man diesen Vorgängen eine große Aufmerksamkeit gewidmet. Eine allseitig anerkannt dastehende Gesetzmäßigkeit, welche die Art und den Verlauf des Elektrizitätsdurchgangs regelt, konnte aber bisher nicht aufgefunden werden. Dagegen besitzen wir eine ganze Menge verschiedener Ansichten, wie der elektrische Durchbruch durch einen festen Nichtleiter stattfindet.

Ein technisches Dielektrikum ist keine einheitliche Substanz, sondern enthält vielerlei verschiedenartige Bestandteile in mehr oder weniger winzigen Ausmessungen in sich eingeschlossen. Infolgedessen stellt sich ein solcher Nichtleiter dar als eine Hintereinanderschaltung von Stoffen, deren jeder eine ihm eigentümliche spezifische Leitfähigkeit und Dielektrizitätskonstante besitzt. Schon der Umstand, daß z. B. bei Preßlingen oder geschichtetem oder naturgewachsenem Material feste Stellen mit weniger festen abwechseln, bedingt eine Änderung des Verhältnisses von spezifischer Leitfähigkeit zur Verschiebbarkeit (Dielektrizitätskonstanten).

Am stärksten ist aus leicht übersehbaren Gründen der Einfluß eines Potentialgefälles auf einen isolierenden Körper, wenn die dielektrisch gefährlichsten Einschlüsse, Luft und Feuchtigkeit, wirksam werden. Die Feldstärken in den Bestandteilen des Nichtleiters ändern sich im umgekehrten Verhältnis der Größe ihrer Dielektrizitätskonstanten. Die Gefährlichkeit eines stark uneinheitlichen Isolierstoffes ist daher außerordentlich groß.

Daß der Wert, welchen man für die Durchschlagsfestigkeit eines Nichtleiters anzusetzen hat, von der Zeit der Einwirkung des elektrischen Feldes auf das Dielektrikum abhängt, ist längst bekannt. Wenn daher teilweise noch die Vorschrift besteht, daß als solcher diejenige Potentialdifferenz zu gelten hat, bei welcher nach 1 Minute der Nichtleiter durchschlagen wird, so ist dies willkürlich. Es ist durchaus nicht der Fall, daß die diesem Wert angenäherte Spannung dauernd vom Isolierstoff ertragen wird. Es kommt hier in hohem Maße auf die Zusammensetzung des Nichtleitermaterials an.

In allen festen Körpern entstehen beim Durchgang von Wechselstrom mehr oder weniger die sog. dielektrischen Verluste, welche den Frequenzen und dem Quadrat der anliegenden Spannung proportional sind. Je homogener der Nichtleiter ist, um so geringer sind diese Verluste, deshalb sind sie direkt ein Kriterium der richtigen Fabrikation.

Bei steigenden Frequenzen wird die Erwärmung des Dielektrikums größer. Daher findet die Zerstörung des Isoliermaterials durch die Belastung mit hohen Frequenzen innerhalb kürzerer Zeit statt, als wenn die Frequenzzahl niedrig ist. Die Dielektrizitätskonstante ist fast unabhängig von der Frequenz. Nur bei großen Verlustwinkeln und hohen Periodenzahlen ist ein Nachgeben festgestellt. Faserstoffnichtleiter pflegen hohe Verlustwinkel aufzuweisen, weil sie hinsichtlich ihrer Homogenität zu wünschen übrig lassen.

In Gasen und Flüssigkeiten treten dielektrische Verluste, wie vorher schon angegeben ist, nicht auf, die Temperaturerhöhung einer Flüssigkeit durch den Strom geschieht ausschließlich durch Wärme, die sich nach dem Jouleschen Gesetz bildet.

Werden feste Körper schmelzflüssig gemacht, verschwindet die Erscheinung der Rückstandsbildung.

Absolut leitunfähig ist kein isolierender fester Baustoff der Elektrotechnik, sondern es sind stets Elektrizitätsträger im Material vorhanden, welche eine Strömung ermöglichen. Je besser das Dielektrikum ist, um so verschwindender gestaltet sich der elektrische Durchgang.

Unter dem Druck des Potentialgefälles verläuft der Stromtransport im Sinne der günstigsten Wege, es geht also durch diejenigen Teilchen des Isoliermaterials, welche eine höhere spezifische Leitfähigkeit haben, eine größere Strommenge hindurch, während der Spannungsgradient sinkt. Infolgedessen entstehen im Isolierstoff Teilchen verschiedener Temperatur. Solange die Stromwärme im vollen Umfang nach außen abgeleitet wird, ist deren Einfluß ziemlich belanglos. Stellt sich bei ansteigendem Elektrizitätstransport heraus, daß das Nichtleitermaterial an irgendwelchen Stellen nicht mehr in der Lage ist, die in ihm erzeugte Wärme an seine Umgebung zu übertragen, so bedeutet dies den sicheren Beginn der stofflichen Vernichtung durch den elektrischen Strom. Denn durch die einsetzende Temperaturerhöhung vermindert sich der Widerstand, die Folge dieser verminderten Ionenreibung ist eine gesteigerte Ionenbewegung. Die vergrößerte Stromleitung bringt aber wieder eine weitere Wärmezunahme mit sich, die jetzt noch weniger abgeführt werden kann wie vorher. Das Ende ist die Zerstörung des Isolierstoffes durch elektrische Entladung.

Wie vorher zum Ausdruck gebracht wurde, ist ein technischer Nichtleiter ein Sammelsurium von allen möglichen Bestandteilen, die in ihren elektrischen Eigenschaften verschieden sind, aber auch in ihren chemischen. Es entstehen auf diese Weise beim Elektrizitätstransport sowohl infolge Auswirkung von elektrischen Kräften als auch sekundärer chemischer Reaktionen äußerst komplizierte Verhältnisse. Schon die Art, wie ein Potentialgefälle von außen in ein Dielektrikum übertritt, bringt Ungleichmäßigkeiten in erheblichem Maße mit sich. Wer-

den im einfachsten Fall ebene Metallplatten als Elektroden benutzt, so gelingt es nicht, diese so genau an den nichtleitenden Stoff anzulegen, daß überall dieselbe Felddichte vorhanden ist, im besonderen nicht an den Rändern der Elektroden. Ein anderes Dielektrikum, nämlich Luft, schiebt sich dazwischen. Hohe Felddichten, die durch die Form der Elektroden sowie die Ungenauigkeiten deren Oberflächen entstehen, stechen gewissermaßen — teils unter Glimmen — in den isolierenden Körper ein und bringen Schädigungen hervor, welche von da aus weiter um sich greifen.

Aber selbst wenn die Belastung des Isoliermaterials durch die Stromquelle ganz gleichmäßig erfolgt, müssen im Isoliermaterial selbst infolge dessen inhomogener Struktur elektrisch verschieden beanspruchte Teilchen entstehen. Das Dielektrikum wird also in ungeraden Linien durchflossen. In den aneinander lagernden Schichten wird der Spannungsgradient am größten, wo die kleinste Dielektrizitätskonstante ist. In einem durch Joulesche Wärme oder dielektrische Verluste erwärmten Nichtleiterteilchen bereitet sich eine Zersetzung des Stoffes vor, die meistens durch freigemachte Feuchtigkeit eingeleitet wird. Besteht das isolierende Material vorzugsweise aus anorganischen Stoffen, ist die Neigung zur Dissoziierung vorhanden, eine Ionenwanderung setzt ein. Je nach der Natur des Dielektrikums bilden sich ferner unter dem Einfluß der Feuchtigkeit Suspensionen und Kolloide. Diese beteiligen sich an der Wanderung. Kohlenwasserstoffe, besonders solche, welche aus niedrig siedenden Homologen zusammengesetzt sind, zerfallen. In lufthaltigen Teilchen entstehen Ozon und Salpetersäure, die in Wechselwirkung mit festen, flüssigen und dampfförmigen Materialteilchen treten, und helfen, die Vernichtung des Isolierstoffes zu vollenden.

Je gleichmäßiger ein Dielektrikum an Struktur ist, umso mehr wird das ganze zwischen den Elektroden befindliche nichtleitende Material unter Spannung erwärmt. Sind aber irgendwo im elektrisch belasteten isolierenden Körper dielektrisch ungünstige Stellen vorhanden, zieht sich der Hauptteil des Leitungsstromes unter Abwendung von den mehr homogenen Teilchen nach diesen Stellen hin und bohrt sich in einer Linie, die meistens kreuz und quer verläuft, den Durchgang. Man nennt diese Linie, welche verkohlte, feuchte und abgerissene Massepartikel zu enthalten pflegt, den Durchbruchskanal. Je dicker das durchschlagene Dielektrikum ist, um so deutlicher treten die gekennzeichneten Erscheinungen auf.

Die metallischen Elektroden, welche den Elektrizitätsfluß durch den isolierenden Körper übertragen, waren schon als Veranlassung von Schädigungen des Nichtleitermaterials charakterisiert. Ähnliche Verhältnisse entstehen aber nicht nur außerhalb, sondern auch innerhalb des Isolierkörpers, denn die Spitzenwirkung, z. B. durch Fasern, macht sich mehr oder weniger geltend. Wie hoch die örtlichen Temperaturen infolge gesteigerter Felddichte sind, ist uns unbekannt. Sie bleiben aber mit hoher Wahrscheinlichkeit nicht in niedrigen Grenzen, so daß Verdampfungen und Verkohlungen eintreten. Fasern und spitze Stoff-

teilchen besitzen die Wirkung der Abdrosselung von Wechselstrom, so daß sich diesem ein Gleichstrom überlagert.

Wird ein isolierender Körper von außen her erwärmt, so sinkt hierdurch seine elektrische Festigkeit. Außerdem wird die Reaktionsfähigkeit der Stoffbestandteile begünstigt und die Ionenreibung erniedrigt. Wahrscheinlich ist der eine Vorgang z. T. die Folge des anderen.

Bei seiner eingehenden experimentellen Beschäftigung mit dem Verhalten von Nichtleitern unter Spannung untersucht K. W. Wagner den „physikalischen“ Vorgang beim elektrischen Durchschlag von festen Isolatoren.

Die Gebiete der Physik und der physikalischen Chemie sind sich in den letzten Jahren überaus nahe gerückt, so daß sich die Grenzen stark verwischen. In den hier vorliegenden Ausführungen liegt, wie schon zu Anfang erklärt wurde, die Absicht vor, nicht die durch Messungen an den Nichtleitern gefundenen Unterschiede zum Gegenstand von Erwägungen über deren konstruktive Verwendbarkeit zu machen, sondern festzustellen, was der Fabrikant von Isolierstoffen zur Erhöhung der Qualität des Nichtleitermaterials unternehmen kann. Die vorliegende Schrift richtet sich daher in erster Linie an den Chemiker und Technologen, denn dieser befindet sich dem Physiker und Elektrotechniker gegenüber erheblich im Rückstand.

Der elektrische Durchschlag von Isolierstoffen ist deshalb hier so aufgefaßt, daß er zu einem wesentlichen Teil durch chemische Reaktionen, Elektrolyse und Elektroosmose, hervorgerufen wird.

Mehrfach betont war bereits, daß ein „technisches Dielektrikum“ oder ein „elektrisches Isoliermaterial“ aus vielerlei Substanzen zusammengesetzt ist. Teilweise wirken die in ihm vorhandenen Bestandteile und Fremdkörper unter dem Einfluß des mehr oder weniger starken elektrischen Feldes aufeinander ein. H. H. Poole¹⁾ hat bereits 1916 festgestellt, daß durch hohe Felddichten eine vergrößerte Leitfähigkeit zustande kommt. Durch die chemischen Umsetzungen, d. h. durch die Elektronen- und Ionenbewegungen, entsteht Wärme. Die Leitfähigkeit nimmt unter dem Druck des elektrischen Feldes weiter zu. Die Reaktionen der Elektronen, Ionen, Molekeln und Stoffteilchen steigern sich so lange, bis die Leitfähigkeit in den Durchbruch übergeht und damit die Zerstörung des Nichtleiters durch die elektrische Energie Tatsache geworden ist.

Es wird also zunächst die Annahme eines „vollkommenen“ Dielektrikums gemacht. Technische Dielektrika enthalten aber in diesem Stoff von außerordentlich hoher Durchschlagsfestigkeit Fremdkörper eingeschlossen. Bei dieser Auffassung ist nunmehr zu untersuchen, ob die Fabrikation auch allen Voraussetzungen Rechnung getragen hat, so daß unter der Stärke des zu erwartenden elektrischen Feldes chemische Reaktionen der Fremdkörper unmöglich werden.

Das elektrische Feld und seine Verteilung, Joulesche Wärme und Temperaturerhöhung durch dielektrische Verluste, spezifische Leit-

¹⁾ H. H. Poole, Phil. Mag. **32** (1916), 112; **34** (1917), 195; **42** (1921), 488.

fähigkeiten und Dielektrizitätskonstanten sind von diesem Gesichtspunkt aus lediglich maßgeblich für die Art und den zeitlichen Verlauf der chemischen Vorgänge. Das Verständnis chemischer Kreise wird erleichtert, und die Bedingungen zur Abstellung bisheriger Mängel an Nichtleitern treten deutlicher hervor. Im übrigen soll es auf keine strittige Frage von großer Bedeutung hinauslaufen, ob die Zerstörung eines Dielektrikums durch den elektrischen Strom „physikalisch“ oder „chemisch“ gedacht wird.

Legt man an einen Nichtleiter, welchen man zu den hygroskopischen rechnet, der also nach 24stündigem Liegen in Wasser oder Wasserdampf ungefähr 1—2 vH Feuchtigkeit aufnimmt, ein Potentialgefälle an, so ruft das elektrische Feld stellenweise Erwärmungen hervor, wenn nicht sogar innerhalb einer kurzen Zeit sofort ein Durchbruchskanal entsteht. Wasser, in reinem Zustande betrachtet, ist nichtleitend. Aber das Wasser ist die Vorbedingung für die Bildung von Ionen sowie elektroosmotischer Prozesse, welche die Veranlassung sind, daß es dem elektrischen Strom gelingt, in das Innere des Isolierkörpers vernichtend einzudringen. Dies hängt erheblich von den Mengen des Wassers ab, welche im Nichtleiterstoff enthalten sind, und außerdem von der mehr oder weniger dichten Struktur des Materiales, wofür später der experimentelle Beweis erbracht wird. Durchsetzung mit Poren, Nestern und Kanälchen sind feuchtigkeitsempfindlichen Isolierstoffen besonders gefährlich. Die spezifische Leitfähigkeit nimmt sehr schnell zu.

In hygroskopischen Materialien kann man unter elektrischer Belastung mitunter eine Verbesserung der Durchschlagsfestigkeit beobachten. Dies ist jedoch eine Täuschung. Die Stromwärme führt zunächst durch Verdampfung von Wasser zu einer Besserung der elektrischen Eigenschaften, welche aber nicht von langer Dauer ist. Der Durchschlag setzt dann bald ein.

Der Einfluß, welchen selbst Spuren von Wasser in Nichtleitern besitzen, ist erkennbar, wenn man die Durchschläge in Kohlenwasserstoffen wie Xylol, Benzin u. a., sowie in Transformatorenölen zum Vergleich heranzieht. Die unter gleichen Bedingungen angestellten Messungen zeigen völlig unübersichtliche Ergebnisse, wenn nicht zuvor die letzten Reste von Feuchtigkeit aus den isolierenden Flüssigkeiten entfernt sind. Der Grad der elektrischen Festigkeit ist also eine Funktion der chemischen Prozesse unter Einleitung und Beteiligung der Wasserionen. Das Elektrodenmaterial spielt in diesem Fall auch eine Rolle mit.

Gegenüber Gleichstrom besitzen feste Isolierstoffe, die verhältnismäßig rein sind, eine um ungefähr ein Fünftel größere Durchschlagsfestigkeit. Hohe Frequenzen setzen die Durchschlagsfestigkeit fester Körper im Gegensatz zum Verhalten isolierender Flüssigkeiten bedeutend herab. So läßt hochgespannter hochfrequenter Strom die elektrische Festigkeit von Glas bis auf ein Drittel sinken, bei Porzellan in ungefähr derselben Weise, bei Hartgummi auf die Hälfte usw. Vulkanfiber und Faturan leiten direkt, wenn hochfrequenter Strom angelegt wird,

ohne daß sie dabei eine merkliche Erwärmung zeigen. Unter diesen Bedingungen können sie daher nicht als isolierendes Material betrachtet werden.

Viele anorganische Körper, die bei normaler Temperatur zu den guten Nichtleitern zählen, versagen in der Wärme, weil ihre Ionenreibung vermindert wird. F. Haber¹⁾ hat bei Porzellan unter Anwendung von Quecksilber-Elektroden festgestellt, daß es von 300° C an beginnt, ein Elektrolyt zu werden und bei seiner Spaltung und Wanderung den Faradayschen Äquivalenzgesetzen zu entsprechen. Ebenso ist das elektrolytische Verhalten der Gläser den Faradayschen Gesetzen entsprechend von Warburg und Tegetmeier ermittelt. Rebeck und Ferguson²⁾ bestätigen, daß dies auch bei niedrigen Temperaturen zutrifft. Ein anorganischer Stoff, welcher bei erhöhter Temperatur und sogar im Schmelzfluß eine hohe elektrische Festigkeit bewahrt, ist Schwefel. Ähnlich verhalten sich die organischen Stoffe Paraffin und Wachs.

Koks ist ein isolierender Körper, trotzdem in ihm freier Kohlenstoff eingeschlossen ist, wie in den meisten nichtleitenden Hartpechen. Bei Erwärmung tritt im Koks eine Zersetzung ein, es bilden sich Wasserstoffverbindungen und um 500° C herum stellt sich unter einem Potentialgefälle ein Strömen von Ionen ein. Frei gewordener Kohlenstoff beteiligt sich an der Leitung.

Technisch wichtige Stoffe, die bei der Fabrikation von isolierendem Baumaterial benutzt werden, sind Kohlenwasserstoffe und Harze. Beide Arten dieser in Benzol und Alkohol löslichen Körper werden oft durch merkliche Mengen von Feuchtigkeit verunreinigt, welche aber erst unter hohem Potentialgefälle Schaden tun. Es ist dies ein Zeichen, daß das Wasser hier nur schwierig Bestandteile findet, welche sich dissoziieren lassen. Auch die Elektrosmose erleidet dadurch eine Verzögerung.

Außer Wasser befinden sich noch Luftteilchen in Kohlenwasserstoffen und Harzen eingeschlossen. Diese scheinen hier elektrisch gefährlicher zu sein wie Feuchtigkeitsreste. Bei manchen festen Harzen, z. B. Fichtenharz, tritt frühzeitig der Zustand ein, daß im Innern Glimmen sichtbar wird und sich dadurch die Zerstörung des Kolophoniums vorbereitet.

Isolierkörper können in bezug auf ihre elektrische Festigkeit Unterschiede zeigen, welche durch die Richtung, wie sie beansprucht werden, bedingt sind. Dies ist z. B. bei trockenen Hölzern der Fall. Es ist diese Erscheinung erklärlich, weil die weichen Stellen eine geringere Widerstandsfähigkeit gegenüber dem Strom haben. Infolgedessen bevorzugt dieser den bequemeren Weg.

Geschichtete Nichtleiter, z. B. die aus lackierten Papierlagen hergestellten viel gebrauchten Hochspannungsmaterialien, sind ausschließlich senkrecht zur Schichtung anzuwenden. In der Längsrichtung geht

¹⁾ Zeitschr. f. anorg. Ch. 57 (1908), S. 154.

²⁾ J. Am. Chem. Soc. 46 (1924), 1991.

die Durchschlagsfestigkeit stark herunter. Nur wenn die innere Papierlage mit Hilfe von isolierenden Bindemitteln behandelt ist, kann man eine Verarbeitung parallel zur Schichtung wagen.

Von erhitzten Kristallen, z. B. dem Kalkspat, ist bekannt, daß die Ionen-Leitfähigkeit des Materials je nach der Stromrichtung verschieden ist.

Je dünner die Nichtleiter sind, um so leichter ist es, die schädlichen chemischen Reaktionen zu unterbinden, weil wir bei der Fabrikation es besser in der Hand haben, die der elektrischen Festigkeit nachteiligen Bestandteile zu entfernen, insbesondere Luft, Wasser sowie Lösungsmittel. Wir gelangen dann in feinen Schichten zu einer sehr hohen elektrischen Widerstandsfähigkeit. So wurde z. B. bei einer Bakelitehaut Modifikation C von 0,005 cm Dicke erst bei 3500 V sinusförmigen Wechselstroms der Durchschlag erreicht. Dies entspricht rechnerisch 700 000 V/cm, wenn ein linearer Verlauf der elektrischen Festigkeit im Material vorausgesetzt wird. Ein Isolierstoff, welcher bei 1 cm Dicke den eben genannten hohen Wert erreicht, ist bisher unbekannt.

Daß eine bessere Auswahl der chemischen Bestandteile, verbunden mit einer Verarbeitung, welche den dielektrischen Verhältnissen mehr wie wir es jetzt vermögen, Rechnung trägt, zu wertvolleren Nichtleitermaterialien führen wird, läßt sich übersehen.

Bisher ist angenommen, daß das elektrische Feld einige Zeit auf den isolierenden Körper einwirkt, ehe der Durchschlag erfolgt. In neuerer Zeit sind Nichtleiter, insbesondere Porzellan-Isolatoren und Hochspannungs-Hartpapiere, in Prüfanlagen, wie sie u. a. Koch & Sterzel A.-G. liefern, mit sog. Stoßspannungen untersucht. Es handelt sich hier um Beanspruchungen von jeweils rd. ein millionstel Sekunde, wobei die steilen Wellenfronten kurzfristig eine große Elektrizitätsmenge auf das Dielektrikum schleudern. Die Vorstellung des elektrischen Durchschlages als vornehmlich chemischer Vorgang ist hier schwieriger. Immerhin ist in Betracht zu ziehen, daß durch die hohe Stromdichte eine plötzliche starke Erwärmung und infolgedessen vergrößerte Zersetzung und verminderte Ionenreibung in den hintereinander geschalteten schädlichen Einschlüssen im Isoliermaterial zustande kommt. Wir kennen leider, wie schon ausgeführt wurde, die örtliche Erwärmung bei derartigen Zuständen zu wenig, um hier sichere Einblicke zu gewinnen. Porzellan ist bei höheren Temperaturen, wie vorher festgestellt ist, ein Elektrolyt, also ein vorzüglicher Stromleiter.

W. Rogowsky nimmt an, daß zweierlei Vorgänge den Durchschlag bewirken, nämlich außer thermischen auch rein elektrische.

Erwähnt sei, daß A. Günther-Schulze die Erscheinungen beim Funkendurchgang durch Isolierstoffe unterteilt. Er bezeichnet das Mindest-Potentialgefälle, bei dem die Entladung durch die im Material vorhandenen Ionen und Elektronen in einen sich durch Stoßionisation bis zur Funkenbildung selbst steigernden Elektrizitätstransport übergeht, als dielektrische Festigkeit.

X. Experimentelle Ermittlungen zur Erzielung elektrischer Festigkeit bei Herstellung technischer Nichtleiter.

Vor ungefähr 15—20 Jahren waren die Anforderungen, welche man in der Elektrotechnik an Isolierstoffe stellte, wenig präzisiert und äußerst bescheiden. Erst um jene Zeit herum fing man an, gezwungen durch die höher gehenden Betriebsspannungen, bei der Lieferung bestimmte Bedingungen zu stellen. Statt Holz, Gestein, Kautschuk u. a. treten jetzt künstliche Isolierstoffe auf. Es war zunächst und lange Zeit nachher noch leichter gesagt wie getan, neue wirklich betriebssichere Nichtleiter zu fabrizieren, weil über dieses Gebiet fast nichts bekannt war, und man im übrigen sich unter Vernachlässigung der mechanischen Eigenschaften nur auf die Erzielung hoher Isolationswerte einstellte. Wohl hatte man mit dem Galvanometer die Leitfähigkeit zu messen versucht, ebenso wurden zur Bestimmung der Durchschlagsfestigkeit unzählige Angaben veröffentlicht, die sich dadurch unvorteilhaft auszeichnen, daß diese Ergebnisse sehr stark, oft um mehrere hundert Prozent, voneinander abweichen. Heute wissen wir, daß solche Ermittlungen nur dann Zweck haben, wenn die Versuchsbedingungen mit bekanntgemacht werden. Die Lehre von der elektrischen Festigkeit hat inzwischen große Fortschritte gemacht und uns hier wichtige Aufschlüsse gegeben.

Unter den damaligen Umständen, wo die Orientierung aus den Quellen der Literatur versagte, half nur die empirische Forschung weiter. Verfasser, welcher in jener Zeit Vorstand einer Gesellschaft für die Herstellung elektrischer Isolierstoffe war, stellte deshalb weitläufige Versuchsreihen an, um einen Einblick in die hier herrschenden unbekanntten Verhältnisse zu gewinnen. Noch heute sind diese Feststellungen hinreichend interessant und können als Beweis für die Zweckmäßigkeit des damaligen Vorgehens, teilweise sogar als Richtung dienen für weitere Forschungen. Es soll deshalb darüber ziemlich ausführlich berichtet werden.

1. Soweit ging damals die Erkenntnis schon, daß Kohlenwasserstoffe, Harze, Asphalte u. dgl. als Bestandteile für die Fabrikation technischer Isoliermaterialien in Frage kommen konnten. Ferner machte man sich die Erfahrungen bei der Anfertigung von plastischen Massen zunutze und sagte sich, daß zur Herstellung fester Körper ein bestimmter Gehalt an Faser Vorteile bringt.

2. Die Einrichtung zum Prüfen der Versuchskörper auf elektrische Festigkeit bestand aus einem Einanker-Umformer, welcher den Gleichstrom der Fabrikzentrale in Wechselstrom von 50 Per./s umwandelte und aus einem Öltransformator, Fabrikat Koch & Sterzel, welcher bis auf 65 kV hinaufging. Die Leistung betrug 6 kW. Das Voltmeter befand sich auf der Niederspannungsseite. Die Elektroden waren in den meisten Fällen eine kreisrunde 2 mm dicke Messingscheibe von 15 cm Durchmesser mit abgerundeten Kanten und eine Messingkugel von 20 mm Durchmesser.

Meistens wurde eine zylindrische eiserne Preßform von 10 cm Innendurchmesser benutzt, deren Wände 3 cm stark waren und Bohrungen für Öl enthielten, in welche Quecksilberthermometer zur Messung der Heiztemperaturen hineingebracht wurden. Der Druckstempel aus Stahl paßte mit dem unteren Ende in Länge von fast 1 cm genau in die Zylinderform hinein, war aber dann bis oben hin um 1 cm im Durchmesser verjüngt. Die Unterlage der Form bestand in einer ca. 3 cm starken kreisrunden Scheibe von 17 cm Durchmesser, aus welcher in der Mitte eine Erhöhung von 5 mm und 10 cm Durchmesser herausgedreht war, in die der Preßzylinder genau hineinpaßt. Eine Vorrichtung, welche nach Bedarf das Unterteil mit dem Zylinder verbindet, war noch vorhanden. Sie wurde aber sehr selten benutzt, weil kein Austreten von Masse stattzufinden pflegte.

Für Ausnahmefälle stand noch eine weitere Eisenform zur Verfügung, deren Wandung 6 cm stark war. Sie besitzt den Nachteil, daß sie sich schwer heizen läßt.

3. Zunächst wurden Faserstoffe ohne Zusätze auf ihre elektrische Brauchbarkeit als Isoliermittel untersucht.

a) Lufttrockener Asbest, wie er als Abfall auf den kanadischen Minen entsteht, mit Faserbündeln und feinen Fasern bis 2 mm Länge, einem Wassergehalt von 10 bis 17 vH, gibt unter dem hydraulischen Druck von 100 kg/cm² der Laboratoriumspresse — die Drucke wurden jeweils 5 Minuten wirken gelassen — eine feste runde Platte von 1 cm Dicke. Eine elektrische Isolierung war nicht vorhanden.

Wird der Druck auf das Doppelte, also auf 200 kg/qcm erhöht, so wird der Preßling fester, aber die Widerstandsfähigkeit gegen den elektrischen Strom hat kaum zugenommen.

Letzteres Verhalten zeigt sich auch noch bei stärkeren und ganz starken Drucken, welche mit einer hydraulischen Fabrikationspresse bis auf 6000 kg/cm², der Grenze der Eisenfestigkeit, auf die Preßmasse ausgeübt wurde. Auch diese schmutzigweiß aussehenden Asbestkörper besitzen trotz größter Zähigkeit kein nennenswertes elektrisches Isoliervermögen. Dem Durchgangskanal des Stroms entspringt reichlicher Wasseraustritt.

Bei den höchsten Belastungen der weichen Asbestmasse hatte sich sowohl im Druckstempel wie in der runden Unterplatte mehrfach eine Kalotte eingedrückt. Die Flächen wurden wieder eben gefeilt, später ließ das Eindrücken nach.

Lufttrockene Asbestabfälle haben also bei Behandlung mit sehr hohen Drucken keine auch nur mäßig isolierenden Körper ergeben. Deshalb wurde nunmehr untersucht, wie sich derselbe Asbest verhält, wenn ihm die schädlich erscheinende Feuchtigkeit entzogen ist. Die Fasern wurden dabei mehrere Stunden auf Temperaturen von 150° gebracht, die letzten Spuren von Wasser konnten aber nicht entfernt werden. Pressungen dieser Masse mit 100 kg/cm² liefern Platten, welche unter Austritt von Wassertröpfchen sofort stromdurchlässig sind. Bei Anwendung von höheren Drucken bis zum Maximum von 6000 kg/cm² tritt nur insoweit eine Änderung ein, als diese viel festeren

Körper bis zu 10 Minuten Zeit brauchen, ehe 2—10 kV den Durchgang erzwingen. Die Werte streuen erheblich.

Asbestabfälle wurden dann bei Rotglut erhitzt und heiß in vorgewärmter Form mit hohen Drucken zusammengepreßt. Das Material hatte aber durch die Vorbehandlung gelitten, indem Hydratwasser ausgetreten war. Also eine chemische Veränderung des Stoffs war vor sich gegangen ist. Die elektrische Prüfung verlief wieder negativ.

Aus den Versuchen läßt sich erkennen, daß die benutzten Asbestfasern unter den stärksten Pressungen weder lufttrocken noch künstlich getrocknet einen wirklichen Nichtleiter zustande bringen. Nach den Anschauungen, wie sie in dem vorhergehenden Kapitel zum Ausdruck gebracht sind, läßt sich schließen, daß die außerordentlich spitzigen steinigen Fäserchen im Innern hohe Felddichten zur Folge haben und eine erhebliche den Wechselstrom gleichrichtende Wirkung ausüben, ferner daß die teilweise nur geringfügige Feuchtigkeit mit den Mineralbestandteilen, vorzugsweise Magnesiumcalcium-Silikaten, die Ionenbildung ermöglicht und die Stromwärme schnell anwachsen läßt. Hinzu kommt, daß die Asbeste und ihre Verunreinigungen infolge ihrer Struktur noch wesentliche Luftmengen eingeschlossen enthalten.

b) Eine weitere Reihe Pressungen wurden in der Weise hergestellt, daß an Stelle von Asbest Sägemehl trat, und zwar solches von Weichholz wie von Hartholz. Es war in Erwägung gezogen, daß dieses billige Produkt die Asbestfasern ersetzen könnte, obwohl man hier eigentlich von Fasern nicht reden kann.

Das Ergebnis in mechanischer Hinsicht war ungünstig, weil sich Sägemehl weniger gut zu mechanisch gleichmäßigen Körpern verpressen läßt als Asbest. Die zertrümmerten Holzbestandteile besitzen nicht die Neigung wie Asbest, in ihrer zusammengedrückten Lage zu bleiben, sondern sie richten sich wieder auf und quellen. Die Stellen, wo der elektrische Strom durch die Preßlinge aus lufttrockener Holzmehlmasse und auch aus solcher, welche bei 110° C getrocknet wurde, hindurchgeht, schwitzen Wasser aus und sind teilweise angekohlt.

Wesentliche Unterschiede im Verhalten von Hart- wie Weichholz wurden nicht festgestellt.

Der Versuch, Holzmehl höherer Hitze auszusetzen, wurde aus Gründen der Zersetzung fortgelassen, ebenso bei der folgenden Versuchsreihe.

c) Weiter ist das Fasermaterial Torf, welches dielektrisch gute Eigenschaften zu haben schien, in derselben Weise wie Asbest und Holzmehl behandelt. Unter den verschiedenartigen Massen, welche unter dem Namen Torf auf den Markt kommen, wurde ein Gemisch aus gleichen Teilen von schwarzem Hochmoortorf und braunem feinfaserigen Niederungsmoortorf ausgewählt, gut lufttrocken gemacht und vermahlen.

Die lufttrockene Masse zeigt nach der Pressung ein schönes ebenholzartiges Aussehen und ist je nach der Höhe des angewendeten Preßdruckes sehr fest. Die Bearbeitung mit Stahlwerkzeugen geht zunächst gut, macht dann aber den Stahl bald stumpf, da infolge der großen

Wärmeleitunfähigkeit örtliche Erhitzung entsteht und schließlich sogar Funkenbildung eintritt, z. B. beim Sägen und Drehen. Die Bohrer werden leicht unbrauchbar.

Das lufttrockene Material, mit 100 kg/cm^2 in 1 cm starke Scheiben gepreßt, läßt sich noch mit 10 kV durchschlagen. Werden aber 200 kg/cm^2 Preßdruck benutzt, gelingt dies selbst mit 50 kV nicht mehr.

In einem mit Dampf geheizten Ofen wurde ein Teil der lufttrockenen staubförmigen Torfmischung, welcher man äußerlich keinerlei Feuchtigkeit ansieht, einem weiteren Trocknungsprozeß unterworfen. Dadurch geht der Wassergehalt von 8—10 vH herunter auf weniger als 1 vH. Diese Trockenmasse ist in der Preßform einem Druck von 100 kg/cm^2 ausgesetzt und die daraus entstehende Scheibe von 1 cm Stärke unter Transformatorspannung gebracht. Sie hält dauernd 65 kV aus.

Dieses Verhalten dient als Beweis dafür, daß der Feuchtigkeitsgehalt hier von Einfluß ist.

Man kann sich die Verhältnisse unter Spannung folgendermaßen vorstellen: Im Falle des niedrigen Preßdruckes reichen 8 vH Wassergehalt hin, daß die durch örtliche hohe Felddichte entstandene Erwärmung eine Auflockerung und Aufblähung erst kleiner Teilchen hervorruft und die Zerstörungsarbeit dann weiter ins Innere überträgt. Diese Befähigung der vorhandenen Wassermenge kann durch das Stärkerwerden der Zusammenpressung der Masse abgeschwächt und schließlich ganz unterbunden werden. Sind nur Spuren von Wasser im Preßling vorhanden, so werden sie in dem Falle den Preßkörper unter hohem Potentialgefälle zerstören, wenn die Möglichkeit der Ionenbildung besteht. Hierfür sind aber die Bedingungen im Gegensatz zu Asbest nicht vorhanden, da das Übermaß an organischen Substanzen nicht elektronenfreundlich ist.

Einer künstlich entfeuchteten Torfprobe, die Anspruch auf hohe elektrische Festigkeit erheben konnte, wurden 2 vH feingepulvertes ausgetrocknetes Kochsalz innig zugemischt, das Ganze dann bei 800 kg/cm^2 Druck zusammengepreßt. Unter 10 kV Spannung dauerte es einige Minuten, dann erfolgte der Durchschlag unter Absonderung einer klebrigen Flüssigkeit.

Die geringe Menge des leicht dissoziierbaren Chlornatriums hat unter der Wirkung von Feuchtigkeitsspuren dem elektrischen Strom den Weg durch den Preßling geöffnet.

Um die Einwirkung der Luftfeuchtigkeit sowie das Lagern in Wasser auf die elektrisch isolierenden Torfpreßlinge festzustellen, wurden sie 24 Stunden entsprechend behandelt. Es traten bei allen Körpern Risse auf, die Masse erweicht, z. T. platzen die Proben schichtenweise auseinander.

Die angefertigten Asbestpreßlinge wurden ebenfalls in Wasser gelegt. Sie nehmen einige Prozente davon auf, behalten aber im großen und ganzen ihre Gestalt.

Da im Torf beim Trocknen und Erwärmen chemische kolloide Reaktionen vor sich gehen, wurden Proben, während sie unter

800 kg/cm² Druck standen, auf 140° erwärmt. Die hohe elektrische Festigkeit ist geblieben, aber zugleich die Empfindlichkeit gegen feuchte Einschlüsse, welche jede technische Verwendung ausschließt.

4. Deshalb wurde jetzt versucht, die Faserstoffe mit isolierenden Körpern zu verarbeiten, welche kein Wasser aufzunehmen vermögen und auch dann, wenn sie der Feuchtigkeit ausgesetzt waren, noch eine erhebliche elektrische Festigkeit zeigen.

Als solche Zusätze werden benutzt: künstliche und natürliche Asphalte, Schwefel, fossile und rezente Harze u. dgl. Die Werte der Durchschlagsfestigkeit dieser Körper sind im trockenen Zustand wie nach der Lagerung im Wasser hoch, wenn auch untereinander verschieden. Sie lösen sich z. T. in Benzol, Toluol, Schwefelkohlenstoff, Alkohol u. a. Im Erweichungspunkt zeigen sie wesentliche Unterschiede.

Es läßt sich bereits auf Grund der vorherigen Versuche voraussehen, daß die Asbestfaser den beiden anderen Stoffen Holzmehl und Torf gegenüber derartig große Vorteile besitzt, daß die letzteren nur noch in Ausnahmefällen mit geprüft wurden.

a) Um die Asbest-Abfallfaser gut mischen zu können, war sie nicht mehr im reinen Zustand zu verwenden, sondern sie wurde mit dem Zwei- bis Dreifachen ihres Gewichtes oder in noch größerem Verhältnis mit mehlflein gepulverten Mineralien, z. B. Flußspat, Quarzpulver u. a., versetzt.

b) Der Höchstgrad einer guten Vermischung der drei Bestandteile Asbest und Quarzmehl mit wasserabweisenden Mitteln, wie z. B. Hartpechen und Harzen, geschieht in der Weise, daß Hartpeche bzw. Harze in einem Lösungsmittel wie 80er Benzol gelöst und mit der Faser und dem Füllmittel zu einem flüssigen Schlamm angesetzt werden, dem man nach Durchrührung dann durch ein Abtreibeverfahren das Lösungsmittel wieder entzieht.

c) Wie aus den vorhergegangenen Versuchen entnommen werden kann, wird Asbest unter einem Potentialgefälle schon angegriffen, wenn auch nur Spuren von Wasser in ihm vorhanden sind. Nach der gewöhnlichen Trockenmethode, auch bei Benutzung von Luftleere, ist die hier notwendige Entfeuchtung nicht hinreichend, weil die Fäserchen das Wasser im Innern festhalten und die entfeuchteten Spitzen beim Liegen an der Luft sofort gierig neue Feuchtigkeit aufsaugen. Ein wirksames Mittel, den Fasern ihre Feuchtigkeitsspitzen zu entziehen, besteht darin, sie in Lösungsmitteln, die kein Wasser aufnehmen, wie z. B. Benzol, auszukochen. Das abgetriebene Benzol enthält dann die in der Asbestfaser vorhanden gewesene Feuchtigkeit am Boden des Rezipienten abgesetzt, da Wasser schwerer ist. Diese Methode des Trocknens konnte mit der des guten Vermischens vereint werden. Es sind also zweierlei wichtige Forderungen für die Herstellung von Isolierstoffen erfüllt, nämlich die Entfernung der Wasserreste aus dem Fasermaterial und natürlich auch aus dem feingepulverten Füllmittel, ebenso aus den Bindemitteln, denn diese können Feuchtigkeit einschließen. Ferner wird erreicht, daß in die Ausgangsstoffe an Stelle der Feuchtigkeit zunächst eine heiße Pechlösung tritt, und sich dann nach Ab-

dampfen des Benzols auf den Fasern und in den Poren Pech niederschlägt. Sämtliche Bestandteile, aus denen der Nichtleiter zusammengesetzt werden soll, haben daher nach der Abtreibung des Lösemittels außen wie innen einen Hartpechlacküberzug erhalten.

Für diese Untersuchungen wurde eine gußeiserne Birne mit doppeltem Boden zum Heizen mit Dampf benutzt. Durch ein Rührwerk konnte ein Umwenden und Vermischen vorgenommen werden. Die übergehenden Benzoldämpfe lassen sich unter Anwendung von Luftleere entfernen.

Die entfeuchtete und gemischte Masse ist bei Hitze aus der Birne herauszunehmen, da sie starr wird. Im erkalteten Zustande muß sie dann zerkleinert werden, um Preßfähigkeit zu erhalten. Die Verpressung kann natürlich jetzt nur unter gleichzeitiger Erwärmung erfolgen, die so hoch sein muß, daß die Bindemittel in den leichtflüssigen Zustand übergehen. Hat der ausgeübte Druck genügend lange, d. h. bis zur sicheren Durchheizung der Preßmasse, angedauert, läßt man die Form erkalten, was durch künstliche Kühlung beschleunigt werden kann.

d) Die ersten Preßversuche, welche angestellt wurden, führten zu keinem günstigen Ergebnis, denn bei der elektrischen Prüfung wurden die 1 cm dicken Preßlinge mit Leichtigkeit durchschlagen. Der Kanal zeigt helle Wassertröpfchen neben dunklen Beimengungen und mitgerissene Substansteile. Es schien ohne weiteres klar, daß der Abtreibungsprozeß noch Mängel hatte. Das Durchrühren der Masse und das Abdampfen wurde in der Folgezeit sorgfältiger beobachtet. Das Ergebnis war nunmehr ein besseres. Die elektrische Festigkeit der Preßlinge stellte sich in mäßiger Weise ein. Bei 50 kg/cm² Druck wurden 1 cm starke Preßlinge im trockenen Zustande bei 2—4 kV innerhalb 5 Minuten durchschlagen, nach Wasserlagerung war die elektrische Festigkeit so gut wie Null. Höhere und hohe Preßdrucke verlängern die Zeit, ehe der Strom durch den Prüfkörper restlos durchbricht. Es waren aber einige Preßlinge unter den Versuchskörpern, trocken wie naß gelagert, die elektrisch recht brauchbar waren.

Die starkstreuenden Werte sind also ein Zeichen dafür, daß ein weiterer Einblick in die unbekanntenen Verhältnisse, wie sich die Preßmasse elektrisch fester machen läßt, notwendig ist. Durch eine chemische Untersuchung ergab sich, daß die aus der Birne herausgenommene Masse noch Benzol enthält, und daß Klumpen von besonders hohem Gehalt an Lösungsmitteln vorkommen. Ebenso ist die Verteilung von Asbestfasern ungleichmäßig gewesen.

e) Der Beschaffenheit der verwendeten Ausgangsstoffe und der Aufbereitung in der Birne wurde eine erneute Aufmerksamkeit geschenkt. Durch Sortierung wurde nur feinfaseriger Asbest für den Versuch ausgewählt und der Mineralstaub einer kontrollierenden Siebung unterzogen. Die Preßmasse besteht aus 20 vH Hartpech, 30 vH Asbestfaser und 50 vH Quarzmehl. Die beiden letztgenannten Stoffe wurden im Schleuderkasten so miteinander vermischt, daß das Pulver in der Faser aufgeht. Dann erst füllte man Asbest-Quarzmehl in die Birne,

welche Hartpech in reichlicher Menge 80er Benzol gelöst enthielt. Wenn nach Zufügen von Faser und Mineralpulver kein leicht beweglicher Schlamm entstanden war, wurde weiteres Benzol zugeführt.

f) Das Rührwerk der Birne wurde beim Abtreibeprozess, der bei 3 Atm. Dampfdruck vor sich ging, so lange im Betriebe gehalten, wie die einsetzende Verdickung es zuläßt. Da nach der bisherigen Erfahrung immer noch Benzol in der Rückstandsmasse bleibt, wurde diese nach dem Erkalten und Grobzerkleinern in dünnen Schichten warm im Vakuum abgesaugt. Es trat dabei ein Zusammenbacken ein, so daß eine nochmalige Zerkleinerung notwendig war.

g) Das hier verwendete Hartpech entstammt dem bei der Steinkohlenteerdestillation gewonnenen Teer. Destilliert man den Teer, so verbleibt nach der Gewinnung des Anthrazenöles ein harter Rückstand, welcher als künstlicher Asphalt oder Hartpech bezeichnet wird. Durch Zusatz von anthrazenfreiem Teeröl hat man es in der Hand, den Rückstand weicher zu machen. Es ist ein kompliziertes Gemisch zum Teil unbekannter chemischer Verbindungen, mechanisch spröde, mit einem Erweichungspunkt von 80° C und einem Schmelzpunkt von ca. 90 bis 100° C. Der Gehalt an elementarem Kohlenstoff beträgt um 40 vH herum. Wurde dieses Hartpech geschmolzen, so tritt starkes Schäumen auf, das von Gasen und vorhandenem Wasser herrührt.

Die Versuchsergebnisse gestalten sich jetzt folgendermaßen: Preßmassen, welche, wie zuletzt angegeben wurde, nur einmal zerkleinert, also nicht in einem zweiten Verfahren nochmals abgesaugt sind, ergeben infolge der sorgfältiger gehandhabten Entfernung des Benzols Preßlinge, welche erheblich besser sind wie solche aus der vorhergehenden Versuchsreihe. Bei 100 kg/cm² Druck betragen die Durchschlagswerte im trockenen Zustande um 6—8 kV Mittelwert herum, nach Wasserlagerung ungefähr die Hälfte. Es kommen aber auch Stellen vor, wo ohne merkliches Potentialgefälle der Strom glatt durch den Preßling hindurchgeht. Charakterisiert wird dieses Material durch eine Kugelelektrode von 5 cm Durchmesser. Die Angriffspunkte der Glimmwirkung liegen hier nicht in einem Kreis, sondern wirr durcheinander, ein Zeichen von ungleichmäßigem Gefüge.

Steigert man den Preßdruck, nimmt die elektrische Festigkeit erheblich zu. Bei 800 kg/cm² läßt sich die 1 cm starke Schicht im trockenen Zustande erst bei rund 40 kV, nach Lagerung im Wasser bei 25 kV durchschlagen. Stärkere Preßdrucke vergrößern diese Zahlen.

h) Wird statt der eben benutzten Preßmasse eine solche verarbeitet, welche noch ein zweites Mal bei Wärme und Luftleere abgesaugt ist, so stellt sich dabei heraus, daß ein Preßprodukt von 100 kg/cm² keine Verbesserung des Nichtleiters gegenüber früher hervorruft. Bei Untersuchung dieser Körper wird dies erklärlich. Die Preßmasse ist weniger „fließend“ geworden, sie braucht also mehr Druck und auch mehr Hitze. Während bisher immer die Temperatur der Stahlform auf 130° C gebracht wurde, genügt dies nicht mehr. Die Erhitzung wird deshalb auf 150° gesteigert, es zeigt sich, daß dadurch ein wesentlicher Fortschritt stattfindet. Von nun an lassen sich die Preßkörper von

1 cm Dicke, trocken wie nach Wasserlagerung, bei Herstellungsdrucken von 100 kg/cm^2 bis zu 6000 kg/cm^2 hinauf mit der höchsten verfügbaren Spannung von 65 kV nicht mehr durchschlagen.

i) Bei gewöhnlicher Temperatur zeigen diese Nichtleiter der Elektrizität sehr gute Eigenschaften, sie sind fest und zähe. Ihre Bearbeitung mit Werkzeugen ist gut. Der Flammbogen hinterläßt eine leitende Bahn. Sie sind aber wenig ölbeständig und erweichen schon unterhalb 100°C . Infolgedessen sind ihrer technischen Verwendung Schranken gesetzt.

5. Faßt man die Ergebnisse aller Versuche zusammen, läßt sich daraus schließen:

Asbestfaser kann ein brauchbares Material für technische elektrische Nichtleiter abgeben. Künstlicher Asphalt oder Hartpech ist, dielektrisch betrachtet, als Bindemittel von Isolierstoffen einer bestimmten elektrischen Festigkeit brauchbar. Quarzsand gibt in feinverteiltem Zustande ein geeignetes Füllmaterial ab. Die drei genannten Körper können aber nur in dem Fall zu einem zuverlässigen Dielektrikum verarbeitet werden, wenn dabei die Bedingungen erfüllt sind, wie sie aus den vorher beschriebenen Versuchen hervorgehen.

6. Im Anschluß hieran ist noch ermittelt, wie sich die Preßlinge verhalten, wenn statt Hartpech sog. amerikanisches Fichtenharz oder Kolophonium verwendet wird. Da sich hier keine nennenswerten Unterschiede ergeben, brauchen diese Untersuchungen nicht im Einzelnen aufgeführt zu werden. Fichtenharz bildet, wie Hartpech, ein wertvolles isolierendes Bindemittel. Gewonnen wird es bei der Destillation von Terpentin, bei welcher es als eine mehr oder weniger durchsichtige geschmolzene in Benzol lösliche Masse hinterbleibt, der Hauptsache nach aus Abietinsäure bestehend.

7. Die Fortführung der Untersuchungen nach der Richtung hin, wie sich die elektrische Festigkeit der Preßlinge noch weiter steigern läßt, erschien interessant und technisch bedeutungsvoll, wenngleich damals noch keine erhebliche Nachfrage nach Hochspannungsisolatoren vorhanden war.

Deshalb wurde der schon beschriebene Weg weiter verfolgt, nämlich die drei Ausgangsstoffe für Nichtleiter: Faser, isolierendes Bindemittel und Füllmaterial noch sinngemäßer auszusuchen und ihre Verarbeitung zu Preßlingen noch sorgfältiger den erkannten Bedingungen anzupassen.

Der Abfallasbest wurde daher durch eine feingesponnene Faser ersetzt, welche ganz rein, fest und mehr wie doppelt so lang ist wie die bisher benutzte. Es war nicht möglich, den bisherigen Prozentsatz von 30 vH beizubehalten. Das Quarzmehl an sich wurde weiter benutzt, aber in einer Feinheit, welche drei Viertel seiner Masse durch ein Bronzesieb von 10000 Maschen pro cm^2 hindurchläßt. An Stelle von Pech treten härtere und reinere fossile Asphaltarten, wie Trinidadasphalte, vor allen Dingen Gilsonite. Erstere erweichen bei ungefähr 100° und schmelzen bei 106°C ; letztere erweichen bei $150\text{--}200^\circ \text{C}$ und schmelzen bei 220°C , ohne sich zu zersetzen.

Die Preßmasse wurde meistens zusammengestellt aus 5 vH karrierter Asbestfaser, 15 vH fossilem Asphalt und 80 vH Quarzmehl. Diese Mischung läßt sich noch gerade, wenn auch schon mit Schwierigkeiten, verarbeiten.

Um die letzten Spuren von Feuchtigkeit aus dem Ansatz zu entfernen, wird so vorgegangen, daß nach der Abtreibung des Lösungsmittels der trockene heiße Rückstand nochmals mit wasserfreiem Benzol in reichlichem Maße getränkt und aufgeweicht wird. Durch erneute Abtreibung im Vakuum bei fortgesetztem Umrühren wird das Benzol wieder entfernt. Dieses Verfahren kann man auch noch ein drittes Mal wiederholen.

Wir haben es hier mit einer sehr zähen und harten Masse zu tun, infolgedessen können nur kleine Mengen in wirklich quantitativer Weise entfeuchtet werden. Es ist unmöglich, aus diesen zähen und faserigen Schichten, wenn sie einigermaßen dick sind, die letzten Wasser- und Benzolreste zu entfernen. Es entstehen dann unter allen Umständen nasse Nester.

Auch die in kleinen Mengen durch mehrmaliges Destillieren in der Birne gewonnenen Preßmassen bedürfen noch nach dem Grobzerkleinern der Absaugung bei Hitze und Luftleere.

Nicht verschwiegen soll werden, daß das mehrmalige Zerkleinern der Masse, um sie absaugungs- bzw. preßfähig zu machen, der mechanischen Festigkeit schadet. Es ließ sich aber hier kein Weg finden, die Faser ganz unversehrt zu erhalten.

b) Die Anwendung von Bindemitteln mit Schmelzpunkten bis zu 220°C macht es natürlich erforderlich, daß die Preßform, während sie unter Druck steht, bis auf rund 250°C zu erwärmen ist. Auch die Preßdrucke sind zu erhöhen.

c) Um mit der vorhandenen Hochspannungsanlage noch orientierende Prüfungen vornehmen zu können, sind die Preßlinge nicht mehr wie bisher in einer Dicke von 1 cm angefertigt, sondern nur noch 2—3 mm stark gemacht. Es zeigt sich, daß solche Scheiben, wenn sie mit Drucken von 100 kg/cm^2 und 200 kg/cm^2 hergestellt waren, bei der elektrischen Belastung sofort durchschlagen, weil sie im Innern porös sind. Erst höhere Preßdrucke, ungefähr von 3—500 kg/cm^2 ab, liefern Prüfkörper, die in Stärken von 2 und 3 mm trocken wie auch nach Wasserlagerung dauernd einem Potentialgefälle von 65 kV widerstehen. Bis zu Temperaturen von ca. 200° behalten sie ihre mechanische Festigkeit, sind äußerst zähe und mit Stahlwerkzeugen bearbeitbar. Das spez. Gewicht liegt um 2,2 herum. Eine Wasseraufnahme konnte nicht festgestellt werden.

XI. Weitere Erörterungen über elektrische Festigkeit und Rohstoffprüfungen.

Die im vorhergehenden Abschnitt beschriebenen experimentellen Arbeiten zeigen, wie man empirisch Einblicke in die Beziehungen gewinnt, welche zwischen der gesuchten elektrischen Festigkeit eines

Isolierstoffes einerseits und seiner Bestandteile sowie deren Umwandlung in einen technischen Nichtleiter andererseits bestehen.

Vor allen Dingen muß man sich abgewöhnen, Parallelen mit der uns geläufigen mechanischen Festigkeit der Körper zu ziehen, denn die Wirkung eines elektrischen Potentialgefälles auf einen Isolator stellt, wie wir annehmen wollen, einen chemischen Prozeß dar. Wandstärken spielen deshalb bei Dielektrizität eine verhältnismäßig geringe Rolle.

1. Bei der Fabrikation aller isolierenden Stoffe hat man sich über die Frage schlüssig zu werden: Mit Hilfe welcher Ausgangsmaterialien und durch welche Art deren Verarbeitung wird es gelingen, in den herzustellenden Nichtleitern sowohl eine von außen einsetzende Änderung in den Elektronenbeziehungen als auch eine im Innern entstehende Elektronenwanderung unmöglich zu machen, und zwar bei denjenigen Spannungen, welche die Isolierstoffe aushalten sollen.

Den größten Beitrag, hier Entscheidungen zu treffen, hat die Chemie zu liefern. Dabei ist die Stärke des Angriffs, welchen die elektrischen Kräfte auf den Stoff oder auf Teile desselben ausüben, aus den Lehren von der elektrischen Festigkeit zu entnehmen. Man erkennt hier schon, daß die Konstruktion der elektrischen Apparate und Anlagen, z. B. durch die Form der Leiter, mit verantwortlich ist für die Betriebssicherheit der verwendeten isolierenden Baumaterialien.

2. Dem Einfluß von Luft und Wasser im Gefüge der Nichtleiter kommt besondere Aufmerksamkeit zu, wie dies früher unter Berücksichtigung der weit auseinanderliegenden Dielektrizitätskonstanten sowie des chemischen Verhaltens betont ist. Bei Erörterung der vorliegenden Fragen liegt es nahe, zu untersuchen, welches wohl die elektrisch festesten Körper sind. Dabei greift man zuerst zu den natürlichen Asphalten, Kohlenwasserstoffen, Harzen, Schwefel u. dgl., also den bekannten Bindemitteln. Der Verfasser hat solche nichtleitenden Stoffe entweder in dünne Scheiben umgeschmolzen oder dickere Scheiben in dünne zersägt, deren Oberfläche dann glatt poliert wurde. Es hat sich dabei aber nicht ergeben, daß außergewöhnlich hohe Durchschlagswerte erzielt wurden, insbesondere nicht solche, die gleichmäßig ausfallen. Die Zahlen weichen sogar stark von einander ab. Untersucht man die elektrisch geprüften Materialien mit dem Mikroskop, läßt sich häufig erkennen, daß die Erstarrung aus der Schmelze zu keinem homogenen Zustand geführt hat, ferner, daß größere und kleinere Gaseinschlüsse vorhanden sind.

Luftblasen können im Dielektrikum zwei ganz verschiedene Wirkungen auslösen. Durch Erwärmung und Erstarrung der Schmelzkörper entstehen luftverdünnte Räume. Wie früher bei dem Verhalten der Gase unter elektrischem Potentialgefälle auseinandergesetzt wurde, ist verdünnte Luft, je nach ihrem Evakuierungsgrad, kein Nichtleiter mehr, sondern das Gegenteil davon, nämlich ein Leiter. Befinden sich also im Isoliermaterial mehr oder weniger bedeutende Einschlüsse von verdünnter Luft, so entsteht eine gefährliche Art von Dielektrizität. Im übrigen wird man bei einer Analyse der genannten Bindemittel ge-

wahr, daß sie erhebliche Feuchtigkeitsmengen einschließen. Auch die fossilen sind nicht ganz frei hiervon.

Für die Verwendung unter hohen Spannungen bedürfen die Bindemittel daher einer entsprechenden Aufbereitung. Das Wasser verläßt die Massen nur schwer. Es befindet sich darin meistens in Form feiner Kügelchen, welche in diesem Zustand bedeutend überhitzt werden können. Deshalb ist erforderlich, zur Vertreibung der Wasserreste Temperaturen von ungefähr 150° C anzuwenden. Die vorzeitig flüchtigen Bestandteile, sofern solche vorhanden sind, werden dann mit entfernt. Es entsteht allerdings die Gefahr, daß durch Erhitzung die Bindemittel chemische Umwandlungen erfahren. Sind diese schädlicher Natur, scheiden derartige Massen aus.

3. Bei der Verarbeitung von isolierenden Bindemitteln zu Nichtleitern unter Benutzung von Faserstoffen, wie Papier, Asbest u. a. hat man den Schmelzpunkt zu kennen. In vielen Fällen gewinnt man aber ein besseres Bild von den Asphalten und dergleichen, wenn man die sog. Penetration bestimmt. Dies geschieht nach mehreren gut ausgearbeiteten Methoden, indem festgestellt wird, wie eine belastete Nadel in die Prüfsubstanz eindringt, also ähnlich wie man die Abbindung des Zements mit der Vikatschen Nadel verfolgt.

4. Um die Kohäsion, die innere Klebkraft, der Bindemittel festzustellen, dient die Untersuchung auf Duktilität. Es ist dies die Fähigkeit der Masse, bei einer festgesetzten Temperatur einen Faden bestimmter Länge zu bilden. Ein brauchbarer Prüfapparat ist von Dow und Smith vorgeschlagen.

5. Die Kenntnis von dem Grad der Verflüssigung oder der Viskosität geschmolzener Bindemittel ist von großer Wichtigkeit bei der Fabrikation von Isolierstoffen. Denn es ist ausgeschlossen, feine Kanäle in den Fasern mit Bindemitteln zu füllen, wenn das Schmelzmittel nicht hinreichend dünnflüssig ist. Die Prüfung der Viskosität geschieht vorteilhaft in bekannter Weise nach Engler, wenn die Temperaturen nicht zu hoch sind.

6. Die Wirkung der Feuchtigkeit in Isolierstoffen, wenn sie sich im elektrischen Felde befinden, zeigt folgende Erscheinung. Es war eine aus Faser, Bindemittel und Füllstoffen bestehende Masse in der Destillationsblase von Benzol befreit und lag in grob gepulvertem Zustande preisbereit vor. Durch die Undichtigkeit zwischen den Flanschen eines Dampfrohres sprühte Wasser in die Masse hinein. Infolge Unachtsamkeit wurde diese trotzdem verarbeitet. Die spätere Untersuchung mit Hochspannung an den fertigen Isolierkörpern zeigt das zunächst überraschende Ergebnis, daß die elektrische Festigkeit nach der Wasserbenetzung nur wenig nachgelassen hatte.

Einer absolut trockenen Preßmasse wurde jetzt absichtlich Feuchtigkeit zugefügt. Das Resultat der Prüfung änderte sich nicht. Die Durchschlagsfestigkeit war nur unbedeutend heruntergegangen. Es ist dies ein Beweis dafür, daß die mineralischen Bestandteile im Nichtleiter, wenn eine dielektrisch richtige Verbindung mit den isolierenden Schmelzmitteln hergestellt ist, wenig oder gar keine Neigung zur Disso-

zierung bekunden, so daß eine Elektronenbewegung nicht zustande kommt.

Vom Schellack ist die interessante Tatsache bekannt, daß dieses hoch isolierende und durchschlagfeste Harz nach den Warburgschen Untersuchungen selbst bei einer beträchtlichen Feuchtigkeitsaufnahme keine Änderung des spez. Widerstandes zeigt.

7. Im vorhergehenden ist nur ein einziges Verfahren eingehend vorgeführt, um aus dreierlei Bestandteilen, nämlich Faser, Bindemittel und Füllstoffen einen Nichtleiter zu erhalten, welcher normalen und hohen Ansprüchen genügt. Bei den vielen anderen Arten von Isolierstoffen, welche die Elektrotechnik braucht, soll auf deren Herstellung nicht im einzelnen eingegangen werden.

Bei der Fabrikation aller dieser anderen Gruppen, seien es Hochspannungs-Porzellane, Mikanit-Produkte, Ausgußmassen, Lacke, Öle, Kabeltränkmassen oder irgendwelche anderen festen oder flüssigen Isolierstoffe, richtet man sich vorteilhaft nach den Erfahrungen, die man bei der Herstellung des Bindemittel-Preßlings sammelte und sucht sinngemäß unter Berücksichtigung der jeweiligen besonderen Verhältnisse die Ausgangsstoffe entsprechend umzuwandeln und in dielektrisch richtiger Weise zusammenzusetzen.

8. Gefühlsmäßig hatte man schon lange herausgefunden, daß sog. „reine“ Isolierstoffe die besten sind, z. B. der natürliche Glimmer. Heute wissen wir, weshalb dies stimmt. Immer wieder kann nur darauf hingewiesen werden, daß die Bestandteile, aus denen der Nichtleiter entstehen soll, mechanisch gleichförmig sein müssen. Selbst mikroskopisch kleine aneinandergereihte Stoffteilchen betätigen ihre Wirkung unter dem Druck des elektrischen Feldes. Einschlüsse von abweichender Verschiebbarkeit und verschiedener Leitfähigkeit sind immer schädlich. An den Grenzflächen sammeln sich Ladungen. Es entstehen Ströme, die Zerstörung setzt ein.

Faserstoffe mit isolierenden Bindemitteln zu füllen, ist deshalb eine schwierige Sache, weil das Lösungsmittel auch nicht in Spuren in den Kanälen und Kapillaren sitzen bleiben darf. Dieses, sowie Luft, Wasserdampf und Zersetzungsprodukte, welche sekundär entstehen, sind zu entfernen. Die Schwierigkeit einer solchen Aufgabe, selbst wenn die modernsten Mittel zur Verfügung stehen, ist offensichtlich. Mitunter kann man im Laboratorium derartige Prozesse mit gutem Erfolg in kleinen Mengen durchführen. Im fabrikmäßigen Betrieb wird die Nachahmung in den meisten Fällen viel zu teuer und verbietet die Ausführung.

9. Deshalb sind an Stelle von fossilen Asphalten, welche sehr gute Nichtleiter ergeben, schon seit längerer Zeit die Phenolharze getreten. Sie besitzen sowohl elektrisch wie mechanisch als auch in technologi-scher Hinsicht gute Eigenschaften. Ihre Verarbeitung zu Hochspannungsisolierstoffen wird später besonders behandelt.

10. Während die elektrischen Eigenschaften des Hartgummis ausgezeichnete sind, versagt dieses Material in mechanischer Hinsicht. Die Wärmefestigkeit ist verhältnismäßig niedrig. Außerdem zersetzt sich

Hartgummi unter dem Einfluß des Lichtes. Es tritt dann eine erhebliche Oberflächenleitfähigkeit ein, die bei Wechselstrom höher ist wie bei Gleichstrom. Mit Phenolharzen hergestellte Dielektrika sind den Hartgummifabrikaten in dieser Beziehung weit überlegen, vor allem auch in der Wärmefestigkeit.

XII. Prüfvorschriften für Isolierstoffe.

Der Verband Deutscher Elektrotechniker hat auf Grund langjähriger Arbeiten der Kommission für Isolierstoffe neue Prüfvorschriften für eine gekürzte Untersuchung von elektrischen Nichtleitern veröffentlicht, welche von der Jahresversammlung 1924 genehmigt sind.

1. Die Physikalisch-Technische Reichsanstalt in Charlottenburg, das staatliche Materialprüfungsamt in Berlin-Dahlem und die Bayrische Landesgewerbeanstalt in Nürnberg sind in der Lage, auf Antrag derartige Prüfungen vorzunehmen und darüber zu bescheinigen.

Der Wortlaut ist folgender:

Vorschriften für die Prüfung elektrischer Isolierstoffe.

Gültig ab 1. Oktober 1924¹⁾.

I. Allgemeines.

Die Untersuchung elektrischer Isolierstoffe erstreckt sich auf folgende Ermittlungen:

A. Mechanische und Wärmeprüfung.

1. Biegefestigkeit.
2. Schlagbiegefestigkeit.
3. Kugeldruckhärte.
4. Wärmebeständigkeit.
5. Feuersicherheit.

B. Elektrische Prüfung.

1. Oberflächenwiderstand.
2. Widerstand im Inneren.
3. Lichtbogensicherheit.

Probenform.

Für die Versuche sind Flachstäbe folgender Abmessungen anzuwenden:

Dicke	a = 10 mm
Breite	b = 15 „
ganze Länge	L = 120 „

Für die Untersuchung eines Isolierstoffes sind insgesamt:

für A Mechanische und Wärmeprüfung: mindestens 30 Normalstäbe,
für B Elektrische Prüfung: 12 Normalstäbe

erforderlich.

¹⁾ Angenommen durch die Jahresversammlung 1924. Veröffentlicht ETZ 1922, S. 445, 1923, S. 577 u. 768, 1924, S. 964 u. 1068.

II. Versuchsausführung.

A. Mechanische und Wärmeprüfung.

1. Biegefestigkeit.

- α) 5 Versuche mit dem Isolierstoff im Anlieferungszustand;
 β) 5 Versuche nach 30tägiger Lagerung in Petroleum bei Zimmertemperatur.

Versuchsausführung bei Zimmerwärme nach Abb. 1. Die Kraft P greift in der Mitte zwischen den beiden Auflagern AA mit einer Druckfinne an, deren Abrundung $r = 10$ mm beträgt. Die Druckfinne ist so anzuordnen, daß sie sich freiwillig satt auf die Probe auflegt. Die Kanten der Auflagern AA sind bei ϱ nach $r = 1$ mm zu brechen. Stützweite gleich 100 mm.

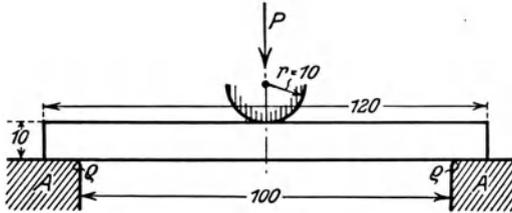


Abb. 1.

Die Belastung ist mit gleichmäßiger Geschwindigkeit, und zwar um 250 kg/cm^2 in 1 min, bis zum Bruch zu steigern.

Für die Feststellung der Gesamtdurchbiegung ist Ablesung am Millimeterstab hinreichend.

Für stoßfreie Belastung und einwandfreie Kraftmessung ist Sorge zu tragen. Ferner ist darauf zu achten, daß die Probe auf den Widerlagern AA satt aufliegt.

2. Schlagbiegefestigkeit.

- α) 5 Versuche bei Zimmerwärme,
 β) 5 Versuche in Kälte bei etwa -20° C .
 (Der Versuch β nur bei Stoffen, die im Freien verwendet werden.)

Die Schlagbiegeversuche sind mit einem Normalpendelschlagwerk auszuführen.

Die Schlagfinne soll einen Schneidenwinkel von 45° besitzen; sie ist nach $r = 3$ mm abzurunden.

Die Stützweite beträgt 70 mm.

Die Auflagern AA müssen gemäß Abb. 2 nach einem Winkel von 15° hinterschnitten, die Auflagerkanten ϱ nach $r = 3$ mm abgerundet werden, damit die Proben unbehindert durch die Auflagern gehen können.

Die Ergebnisse sind in cmkg/cm^2 anzugeben.

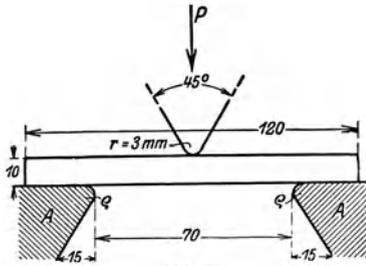


Abb. 2.

3. Kugeldruckhärte.

5 Versuche bei Zimmerwärme.

Eine Stahlkugel von 5 mm Durchmesser ($D = 0,5 \text{ cm}$) wird mit einem konstanten Druck von 50 kg in die Probe stoßfrei eingedrückt. Gemessen wird die Eindringtiefe h nach 10 und 60 s. Aus dieser wird der Härtegrad H in kg/cm^2 nach der Formel berechnet:

$$H = \frac{P}{\pi \cdot h \cdot D} = \frac{C}{h}.$$

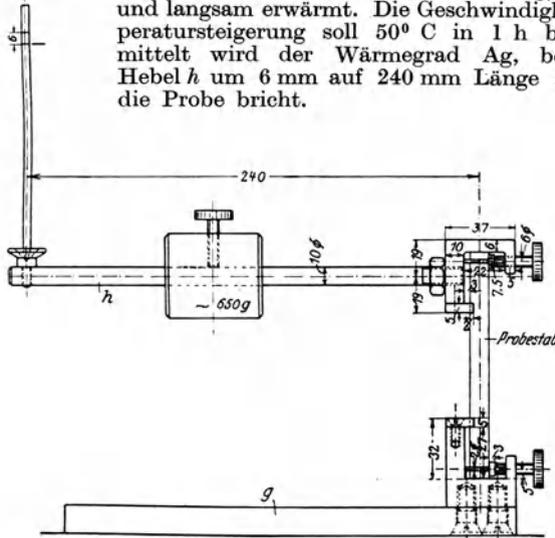
Die Eindrücke sollen in der Mitte der 15 mm breiten Proben liegen.

4. Wärmebeständigkeit.

3 Versuche.

Die Wärmebeständigkeit ist durch die Martensprobe mit einem Normalapparat festzustellen.

Die in senkrechter Lage von der Grundplatte *g* (s. Abb. 3) festgehaltenen Proben werden durch angehängte Gewichtshebel *h* mit der konstanten Biegespannung $\sigma = 50 \text{ kg/cm}^2$ belastet und langsam erwärmt. Die Geschwindigkeit der Temperatursteigerung soll 50° C in 1 h betragen. Ermittelt wird der Wärmegrad *Ag*, bei dem der Hebel *h* um 6 mm auf 240 mm Länge absinkt bzw. die Probe bricht.



Martensprobe zur Wärmebeständigkeitsprüfung von Isolierstoffen. Aufriß.

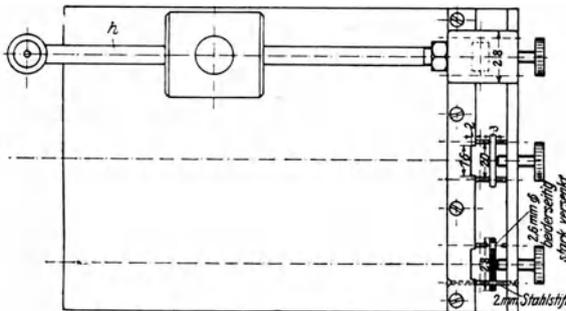


Abb. 3. Grundriß.

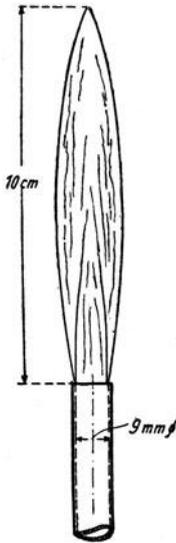
5. Feuersicherheit.

3 Versuche.

Ein wagrecht eingespannter Normalstab wird 1 min lang der Flamme eines mit Leuchtgas gespeisten Bunsenbrenners ausgesetzt. Die Brenneröffnung soll 9 mm, die Flammenhöhe bei senkrecht gestelltem Brenner 10 cm betragen.

Der Brenner ist unter 45° zu neigen und der Stab so in die Flamme zu bringen, daß sich die untere 15 mm breite Stabfläche 3 cm über der

Brenneroberfläche und seine Stirnkante 1 cm in wagerechtem Abstand von der Brennerunterkante befindet (vgl. Abb. 4).



Das Verhalten der Isolierstoffe ist nach folgenden drei Stufen zu beurteilen:

1. Der Stab brennt nach dem Entfernen der Flamme länger als $\frac{1}{4}$ min weiter.
2. Der Stab brennt nach dem Entfernen der Flamme nicht länger als $\frac{1}{4}$ min. weiter.
3. Der Stab entzündet sich nicht in der Flamme.

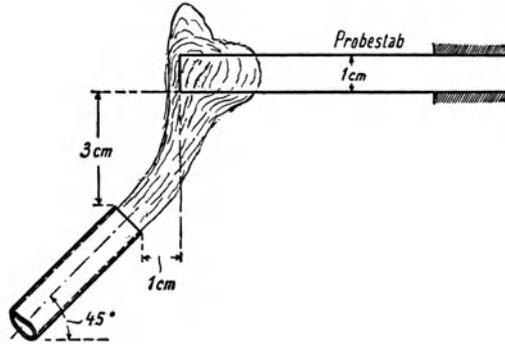


Abb. 4.

B. Elektrische Prüfung.

1. Oberflächenwiderstand.

Der Oberflächenwiderstand wird gemessen auf einer Fläche von 10×1 cm bei 1000 V Gleichspannung:

- α) im Zustand der Einsendung, jedoch nach Abschleifen der Oberfläche,
- β) nach 24stündiger Einwirkung von Wasser;
- γ) nach 3wöchentlicher Einwirkung von 25proz. Schwefelsäure,
- δ) nach 3wöchentlicher Einwirkung von Ammoniakdampf.

Bei den Versuchen β bis δ wird die unter der Einwirkung der Flüssigkeiten und Gase etwa eintretende Gewichtsänderung in Prozenten ermittelt.

Zur Messung des Oberflächenwiderstandes werden zwei gerade, 10 cm lange, mit Gummi und Stanniol gepolsterte Elektroden einander parallel in 1 cm Abstand auf die Platte gesetzt (siehe den Normalapparat Abb. 5; das Schaltschema zeigt Abb. 6). Die eine Elektrode wird über einen Schutzwiderstand von 10000Ω mit dem negativen Pol der Gleichspannung von 1000 V verbunden, deren positiver Pol geerdet ist; die andere Elektrode wird mit einer Klemme des Galvanometernebenschlusses verbunden, dessen andere Klemme an Erde liegt. Um Kriechströme von der Messung auszuschließen, ist die Zuleitung zum Nebenschluß und von da zum Galvanometer mit einer geerdeten Umhüllung zu versehen, z. B. als Panzerader auszuführen. Die Halteplatte der Elektroden ist zu erden, das Galvanometer und sein Nebenschluß sind auf geerdete Unterlagen zu stellen; die Empfindlichkeit des Galvanometers soll mindestens 1×10^{-9} A für 1 mm Ausschlag bei 1 m Skalenabstand betragen; durch den Nebenschluß ist die Empfindlichkeit stufenweise auf $\frac{1}{10}$, $\frac{1}{100}$, $\frac{1}{1000}$, $\frac{1}{10000}$ und $\frac{1}{100000}$ herabzusetzen. Ein Kontakt des Nebenschlusses dient ferner zum Kurzschließen des Galvanometers; zur Eichung des Galvanometerauschlages wird beim Nebenschluß $\frac{1}{100000}$ statt des Oberflächenapparates ein Drahtwiderstand von $1 M\Omega$ eingeschaltet. (Dieser wird aus 0,05 mm starkem

Manganindraht unifilar aufgewickelt und braucht nur auf 3 vH abgeglichen zu sein.) Der Schutzwiderstand besteht aus 0,1 mm starkem Manganin-

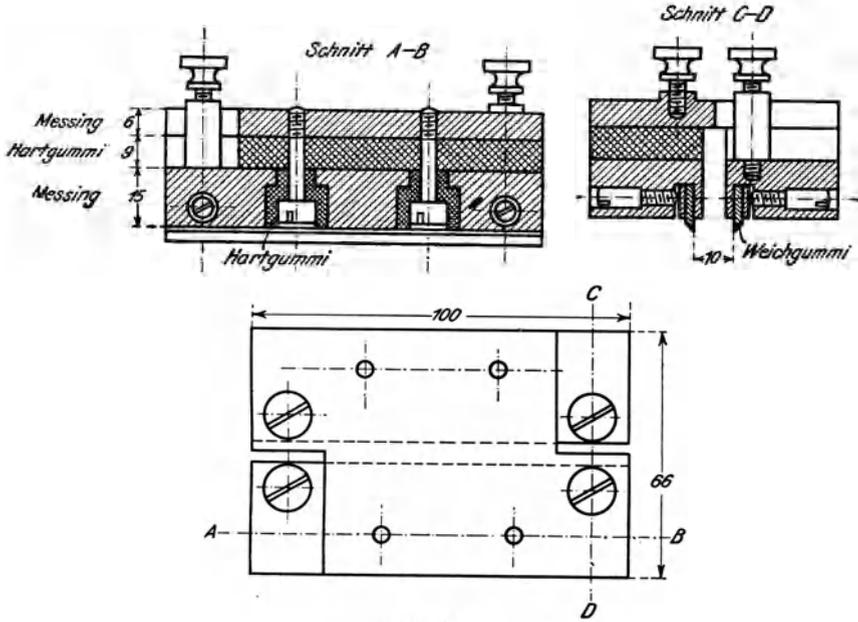


Abb. 5.

draht, der unifilar auf ein Porzellan- oder Glasrohr von etwa 6 cm Durchmesser und 50 cm Länge aufgewickelt ist, der Schutzwiderstand ist eben-

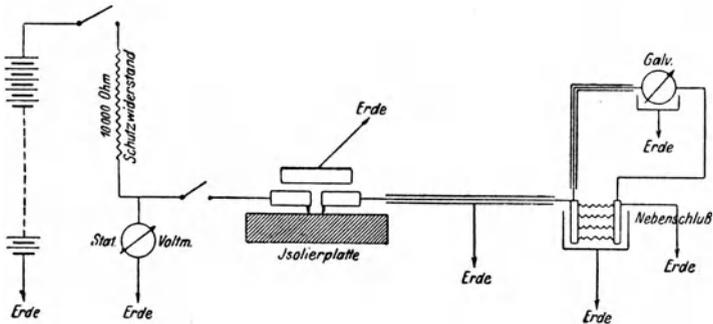


Abb. 6.

falls auf 3 vH genau abzugleichen. Ein statischer Spannungsmesser mißt die Spannung hinter dem Schutzwiderstand.

Gang der Messung.

Bei geöffnetem Schalter zwischen Schutzwiderstand und Oberflächenapparat wird mit Hilfe des statischen Spannungsmessers die Gleichspannung auf 1000 V eingestellt. Bei kurzgeschlossenem Galvanometer wird dann der

Schalter zu dem Oberflächenapparat geschlossen; sinkt dabei die Spannung des Spannungsmessers unter 500 V, so beträgt der Oberflächenwiderstand des Isolierstoffes weniger als 10000 Ω ; bleibt die Spannung über 800 V, so kann mit dem Galvanometer gemessen werden.

Die Ablesung des Galvanometerauschlages erfolgt 1 Min. nach dem Anlegen der Spannung.

Die Vergleichszahlen stufen sich folgendermaßen ab:

Oberflächenwiderstand	Vergleichszahlen
unter $\frac{1}{100} M\Omega$	0
1 bis $\frac{1}{100} M\Omega$	1
100 bis 1 $M\Omega$	2
10 000 bis 100 $M\Omega$	3
1 Mill. bis 10 000 $M\Omega$	4
über 1 Mill. $M\Omega$	5

Zu jeder Versuchsreihe sind drei Platten zu verwenden, an jeder Platte sind mindestens zwei Messungen vorzunehmen. Die zu dem Versuch β verwendeten Platten können zu dem Versuch γ weiter benutzt werden.

Zu β . Nach dem Herausnehmen aus dem Wasser werden die Platten mit einem Tuch abgerieben und senkrecht bei Zimmertemperatur in nicht bewegter Luft 2 h stehen gelassen, um die äußerlich anhaftende Feuchtigkeit zu entfernen. Danach wird die Messung vorgenommen.

Zu γ . Nach dem Herausnehmen aus der Schwefelsäure werden die Platten etwa 1 min in fließendem Wasser abgespült, danach wie unter β behandelt.

Zu δ . Die Platten werden in großen Glasgefäßen aufgehängt, auf deren Boden sich eine gesättigte wässrige Ammoniaklösung befindet, die Gefäße werden mit Glasplatten abgedeckt. Von drei zu drei Tagen wird etwas Ammoniak zugefüllt, um die Verluste am Ammoniakdampf zu decken. Nach dem Herausnehmen aus den Gefäßen werden die Platten nach Feststellung des Aussehens mit einem trockenen Tuch abgerieben und gemessen.

2. Widerstand im Inneren.

Zwei Löcher von 5 mm Durchmesser und 15 mm Mittenabstand sind in die Platte auf etwa $\frac{2}{3}$ der Plattenstärke tief zu bohren und mit Quecksilber zu füllen. Der Widerstand zwischen den beiden Quecksilberelektroden wird bei 1000 V Gleichspannung gemessen; ist dieser kleiner als der bei dem Versuch α ermittelte Oberflächenwiderstand, so ist die Platte bis in tiefere Schichten abzudrehen und unmittelbar nach dem Abdrehen auf ihren Oberflächenwiderstand zu messen.

3. Lichtbogensicherheit.

Die Platte wird wagerecht gelegt und zwei angespitzte Reinkohlen von 8 mm Durchmesser werden in einem Winkel von etwas mehr als einem rechten gegeneinander, etwa um 60° gegen die Wagerechte geneigt, auf die Platte gesetzt. An die Kohlen wird eine Spannung von etwa 220 V unter Vorschalten eines Widerstandes von 20 Ω gelegt. Nach Bildung des Lichtbogens zwischen den Kohlen werden diese mit einer Geschwindigkeit, die 1 mm in 1 s nicht überschreiten soll, auseinander gezogen. Dann werden folgende vier Stufen der Sicherheit gegenüber dem Lichtbogen unterschieden:

0. Unter dem über 20 mm lang ausziehbaren Lichtbogen bildet sich eine leitende Brücke im Isolierstoff, die auch nach dem Erkalten leitend bleibt.

1. Unter dem über 20 mm lang ausziehbaren Lichtbogen bildet sich eine leitende Brücke im Isolierstoff, die aber nach dem Erkalten ihre Leitfähigkeit verliert.

2. Der Lichtbogen läßt sich weiter als 20 mm ausziehen, es bildet sich aber keine zusammenhängende leitende Brücke im Isolierstoff.

3. Der Lichtbogen läßt sich nicht über seine normale Länge von etwa 20 mm ausziehen.

Erläuterungen zu den Vorschriften über die Prüfung elektrischer Isolierstoffe.**Einleitung.**

Die Vorschriften erstrecken sich auf die Prüfung von Isolierstoffen in besonders hergestellten normalen Formen. Diese Prüfung dient zur Beurteilung des Stoffes an sich, sie ist eine Materialprüfung. Die Festlegung bestimmter Prüfverfahren gibt die Möglichkeit, wesentliche Eigenschaften eines Isolierstoffes, obwohl sie nicht physikalische Konstanten sind, in reproduzierbarer Weise festzustellen und eindeutig anzugeben. Der Hersteller kann sich dadurch über die Güte seines Erzeugnisses und die Gleichmäßigkeit der Herstellung Rechenschaft geben; dem Konstrukteur bieten die Angaben der Eigenschaften Anhaltspunkte für die Auswahl des für seine Zwecke geeigneten Isolierstoffes.

Die im Preßverfahren zu verarbeitenden Isolierstoffe ergeben aber in den fertigen Isolierteilen für die spezifischen Eigenschaften Zahlen, insbesondere Festigkeitswerte, die von denen, die an Normalstäben und -platten aus dem gleichen Stoff festgestellt werden, je nach der Formgebung des betreffenden Stückes und dem Herstellungsdruck mehr oder weniger wesentlich abweichen; auch werden an verschiedenen Teilen des gleichen Isolierstückes verschiedene Zahlen gefunden. Die Untersuchung eines Isolierstoffes kann mithin nicht ohne weiteres dazu dienen, wie bei einem völlig homogenen Baustoffe zahlenmäßige Unterlagen für die Berechnung der zweckentsprechenden Formen und Abmessungen eines Isolierteiles zu liefern oder Abnahmebedingungen für Isolierteile aufzustellen. Daher ist neben der Materialprüfung an den Normalformen noch eine Prüfung des fertigen Isolierteiles in der Verwendungsform, die Stückprüfung, notwendig, um festzustellen, ob sich der gewählte Isolierstoff in dieser Form bewährt. An den Grundlagen zu den Vorschriften für die Stückprüfung arbeitet die vom VDE eingesetzte Untersuchungsstelle für fertige Isolierteile in Nürnberg.

Mit den vorliegenden Vorschriften für die Materialprüfung ist also nur ein Teil der Gesamtaufgabe erfüllt. Die Vorschriften enthalten nur die Versuche, die zur Charakterisierung des Isolierstoffes unbedingt notwendig sind. Sie sind aus der sehr viel größeren Zahl der Versuchsreihen ausgewählt, die zur Schaffung der Grundlagen von dem Materialprüfungsamt und der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt angestellt waren (Passavant, „ETZ“ 1912, S. 450). Für manche Zwecke werden weitere Untersuchungen als die in den Vorschriften enthaltenen notwendig sein, z. B. bei Isolierstoffen, die für Spannungen über 750 V verwendet werden sollen, die Bestimmung der Durchschlagspannung. Empfohlen wird, sich in solchen Fällen nach den in dem genannten Aufsatz beschriebenen weitergehenden Versuchen zu richten.

Allgemeines.**Die Probenform.**

Für die Abmessungen der Prüflinge war in erster Linie maßgebend, daß einige Isolierstoffe nicht in geringerer Dicke als 10 mm hergestellt werden konnten. Für die mechanische Untersuchung ist die Stabform die geeignetste; für die elektrische Untersuchung war zuerst die Platte vorgesehen; da sich aber hierfür der Stab ebenfalls als geeigneter erwies, wurde dieser als Normalform für die gesamte Prüfung gewählt. Das Herausschneiden von Stäben aus einer Platte empfahl sich nicht, weil sich einige Preßstoffe schlecht schneiden lassen und zum Teil die Festigkeitseigenschaften von der Preßhaut abhängig sein können.

Die Breite und die Länge des Stabes sind nun so gewählt, daß die Biegespannung in kg/cm^2 nach A 1 zahlenmäßig zehnmal so groß wie die Belastung in Kilogramm ist.

Mechanische Prüfungen.

Die mechanischen Prüfungen suchen möglichst die Beanspruchungen zu erfassen, denen der Isolierstoff betriebsmäßig ausgesetzt ist, nämlich Biegung, Schlag und Druck.

Zu A 1. Biegefestigkeit. Die Biegespannung σ_b ist das Verhältnis des Biegemomentes M zum Widerstandsmoment W . Wirkt in der Mitte des auf zwei Auflagern im Abstände l voneinander aufliegenden Probestabes die Kraft P , so ist das Biegemoment $M = \frac{Pl}{4}$.

Das Widerstandsmoment W des rechteckigen Stabes ist $W = \frac{bh^2}{6}$, worin b die Breite und h die Höhe (= Dicke) des Stabes in Zentimeter bedeuten; bei genauer Einhaltung der gewählten Abmessungen $l = 10$ cm, $b = 1,5$ cm, $h = 1$ cm ist $\sigma_b = 10 P$ (kg/cm²).

Die ersten Vorschriften sahen stufenweise Belastung in Stufen von je etwa 150 kg/cm² vor, die 2 min lang auf den Probestab wirken sollten. Diese Stufen sollten als Gütegrade für die Klasseneinteilung der Isolierstoffe dienen; sie erwiesen sich aber für die Bedürfnisse der Praxis als zu grob und deshalb wurden in der Ausgabe der Prüfvorschriften vom April 1922 Belastungsstufen in kleineren Abständen eingeführt. Nachdem aber einmal die Gütegrade verlassen waren, hatte die schrittweise Steigerung der Belastung keinen rechten Zweck mehr; daher wurde dazu übergegangen, die Belastung gleitend bis zum Bruch zu steigern, wie es bei Festigkeitsuntersuchungen allgemein üblich ist. Die Versuchsausführung ist dabei bequemer, weniger zeitraubend und ergibt die genaue Bruchlast. Um den Einfluß verschiedener Belastungsgeschwindigkeit auszuschalten, ist eine bestimmte Geschwindigkeit, nämlich 250 kg/cm² in 1 min, festgesetzt worden, so daß ein Versuch mit einem Stoff mittlerer Festigkeit etwa 1 min dauert. Will man aus dem Biegeversuch einen Anhalt über die Nachwirkung gewinnen, so kann man den Versuch mit größerer oder kleinerer Geschwindigkeit wiederholen. Eine ausreichende Vorstellung über die Größe der Nachwirkung ergibt sich aber schon aus dem Versuch A 3, Kugeldruckhärte, bei dem die Eindringtiefe nach zwei verschiedenen Belastungszeiten bestimmt wird.

Von den chemischen Einflüssen, denen der Isolierstoff im Betriebe ausgesetzt ist, sind die Einwirkungen von Mineralölen, Säuren und Laugen die häufigsten.

Der Angriff von Mineralöl ist nur durch die mechanische Prüfung zu erfassen; der Angriff von Säuren und Laugen beeinflusst hingegen den elektrischen Oberflächenwiderstand des Isolierstoffes sehr viel stärker als die mechanische Festigkeit, er wird daher durch die elektrische Prüfung B 1, γ und δ festgestellt.

Zu A 2. Schlagbiegefestigkeit: Die Prüfung auf Schlagbiegefestigkeit dient zur Beurteilung der Sprödigkeit von Isolierstoffen, d. h. ihres Verhaltens gegenüber stoßweise auftretender Beanspruchung.

Das bisher verwendete Pendelschlagwerk von 150 cm/kg Arbeitsinhalt war nach den festesten Isolierstoffen (Hartpapiere u. dgl.) bemessen worden. Jedoch hat sich als zweckmäßig herausgestellt, die weniger festen Stoffe mit leichteren Pendelschlagwerken zu prüfen, um die Unterschiede bei kleinen Schlagarbeiten besser erkennen zu können. Die Firma Louis Schopper, Leipzig, hat auf Anregung der Kommission für Isolierstoffe des VDE das in Abb. 7 dargestellte Pendelschlagwerk gebaut, das mit zwei auswechselbaren Pendeln von 10 und 40 cm/kg Arbeitsinhalt versehen ist.

Die Firma hat die Genehmigung zur Bekanntgabe nachstehender Hauptabmessungen erteilt:

	Pendel für 10 cm/kg	Pendel für 40 cm/kg
Elevationswinkel	160°	160°
Gesamtgewicht der pendelnden Masse	304 g	1020 g
Abstand des Schwerpunktes von der Pendelachse	169,2 mm	202 mm
Fallhöhe des Schwerpunktes	328,3 „	391,8 „
Abstand der Schneidemitte von der Pendelachse	225 „	225 „

Das 10 cm/kg-Pendel wird bei gewöhnlichen gepreßten Isolierstoffen benutzt, das 40 cm/kg-Pendel bei Hartgummi. Der Apparat ist außer mit Auflagern für Normalstäbe auch noch mit Auflagern für $5 \times 10 \times 60$ mm Stäbe eingerichtet. Das 150 cm/kg-Pendelschlagwerk wird nur noch für Stoffe höchster Festigkeit benutzt.

Für genau senkrechte Aufstellung des Apparates auf genügend fester Unterlage ist Sorge zu tragen.

Das Pendel, Abb. 7, fällt bei einer Auflösung der Klinke K aus einem Elevationswinkel von 160° . In der tiefsten Stellung trifft es auf die Probe und schwingt, nachdem es die Probe durchschlagen hat, auf der anderen Seite durch. Die Größe der Durchschwingung (Steighöhe) wird in Winkel-

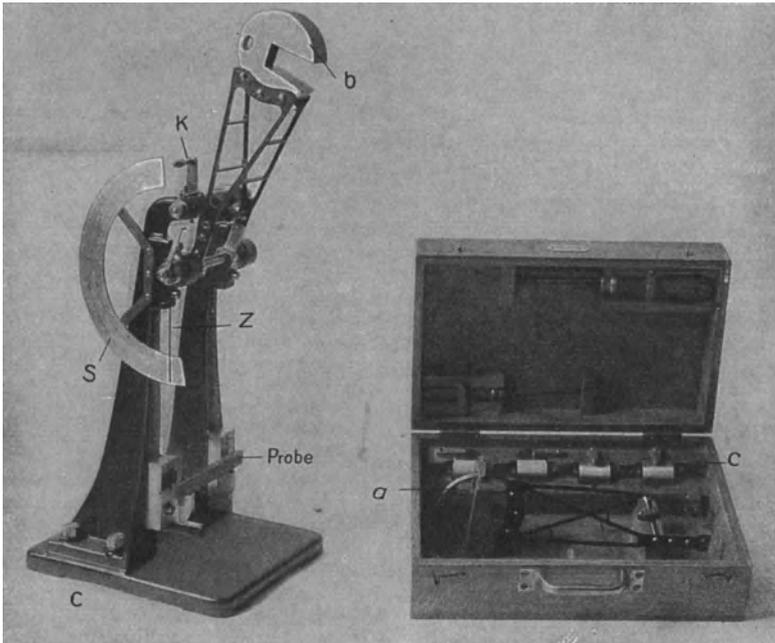


Abb. 7. Pendelschlagwerk.

graden an der Skala S mit Hilfe des Schleppzeigers Z abgelesen. Aus der Steighöhe ergibt sich der nach dem Bruch der Probe im Pendel noch vorhandene Arbeitsinhalt. Der Unterschied der Steig- gegen die Fallhöhe unter Berücksichtigung des Gesamtarbeitsinhaltes des Pendels ergibt die durch die Probe aufgenommene Schlagarbeit. Die Reibung des Pendels und des Schleppzeigers ist in den Teilungen der Skala für die Steighöhe bei dem 10/40 cm/kg-Pendelschlagwerk bereits berücksichtigt, so daß besondere Abzüge für den Leerlaufverlust nicht zu machen sind.

Zweckmäßig ist es, von Zeit zu Zeit festzustellen, ob sich die Reibung des Kugellagers und Schleppzeigers etwa geändert hat. Bei guter Instandhaltung des Apparates treten allerdings kaum Änderungen auf. Da die Fallarbeit nicht den Winkelgraden, sondern den Fallhöhen proportional ist, trägt man sich zweckmäßig zur Bestimmung der von den Proben aufgenommenen Schlagarbeiten eine Kurve auf.

Die Sprödigkeit nimmt im allgemeinen mit abnehmender Temperatur zu. Für Stoffe, die im Freien verwendet werden, ist daher noch der Schlag-

biegeversuch bei Kälte vorgeschrieben. Die Temperatur von etwa -20° läßt sich durch eine Viehsalzeismischung etwa im Verhältnis 1:2 bis 1:1 erreichen. Besonderes Augenmerk ist darauf zu richten, daß die Proben auch tatsächlich diese Temperatur annehmen; dieses wird am zuverlässigsten erreicht, wenn man sie etwa 20 Min. lang in die Kältemischung selbst legt. Jede Probe wird unmittelbar vor dem Versuch aus der Kältemischung herausgenommen, dabei möglichst nicht in der Mitte mit den Händen berührt, entweder gar nicht oder nur ganz oberflächlich von der anhaftenden Flüssigkeit befreit und so schnell wie möglich geprüft.

Zu A 3. Kugeldruckhärte: Zur Ermittlung der Widerstandsfähigkeit eines Stoffes gegen Druckbeanspruchung kann man verschiedene Verfahren anwenden. Die hier vorgesehene Kugeldruckprobe dient nicht zur Bestimmung der eigentlichen Druckfestigkeit, sondern der Härte, und zwar nach dem sogenannten Eindruckverfahren.

Nach den früheren Vorschriften wurde eine 5 mm-Kugel aus glashartem Stahl 0,1 mm tief in die Probe eingedrückt und als Härtemaßstab die zur Erzeugung dieser Eindringtiefe erforderliche Kraft gewählt. Im Laufe der Zeit stellte sich heraus, daß dieses Verfahren für die Isolierstoffprüfung weniger geeignet ist, weil verschiedene Isolierstoffe starke Nachwirkung aufweisen, so daß man bei dem gleichen Stoff größere oder kleinere Kräfte zur Erzeugung einer bestimmten Eindringtiefe erhält, je nachdem man die Kraft schnell oder langsam anwachsen läßt. Ein zuverlässiger Maßstab für die Nachwirkung läßt sich aus dieser Ausführungsform der Kugeldruckhärteprobe aber nicht gewinnen. Die neuen Vorschriften greifen deshalb auf die ursprüngliche Ausführungsform der Brinellschen Kugeldruckprobe zurück. Die Kugel (5 mm Durchmesser) wird mit einer konstanten Belastung von 50 kg aufgedrückt; der Härtemaßstab ist ein Wert in kg/cm^2 als reziproker Wert der Eindringtiefe h in Zentimeter (zu messen ist mindestens auf $\frac{1}{100}$ mm genau) multipliziert mit einer Konstanten, deren Bestimmung sich aus der in den Prüfvorschriften mitgeteilten Formel ergibt. Hierbei kann bequem etwaige Nachwirkung beobachtet werden; für Isolierstoffe sind deshalb zwei Ablesungen festgesetzt worden, und zwar nachdem die schnell, aber stoßfrei aufgebrachte Belastung von 50 kg 10 und 60 s lang gewirkt hat.

Zu A 4. Wärmeprüfung: Da viele Isolierteile im Betriebe bei einer zum Teil weit über Zimmerwärme liegenden Temperatur noch ausreichende Festigkeit aufweisen müssen, ist eine dahingehende Prüfung erforderlich. Von den verschiedenen sich hierfür bietenden Möglichkeiten hat man der Einfachheit der Versuchsausführung halber die Martensprobe in die Vorschriften aufgenommen.

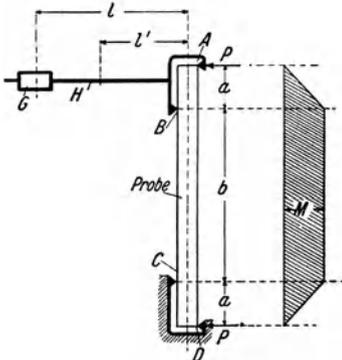


Abb. 8.

Die schematische Abb. 8 stellt die Beanspruchung des Probestabes beim Martenschen Warmbiegeversuch dar. Das Gewicht G erzeugt am Hebelarm l das Moment $M = G \cdot l$. Die Beanspruchung des Probestabes ist die gleiche wie bei einem auf B und C als festen Stützpunkten gelagerten, an den überragenden Enden A und D im Abstand a von den Stützpunkten mit den Kräften P belasteten Biegebalken. Das Biegemoment steigt von A bis B und von D bis C auf seinen Höchstwert $M = G \cdot l$, der auf die ganze Länge b zwischen den Stützpunkten B und C konstant bleibt. Dem Moment $G \cdot l$ entspricht an der Probe das Moment $P \cdot a$, also $M = G \cdot l = P \cdot a$. Man wird zweckmäßig den Hebelarm a für die Kraft P nicht zu klein wählen, damit P nicht zu groß wird und damit örtliche Eindrücke an der Probe hervorruft. Die Länge b ist innerhalb weiter Grenzen gleichgültig. Bei zu großem b wird der Fehler nicht mehr vernachlässigbar, der durch

Absinken des Belastungshebels H und seitliches Ausweichen der Probe eine Änderung des Momentes $G \cdot l$ bedingt. Die Abmessungen des Normalstabes und des Normalapparates ergeben jedoch für b eine zweckmäßige Größe. Wählt man l nicht zu klein, so daß G nicht zu groß wird, so ist auch die durch das Gewicht G erzeugte, im Stabe senkrecht wirkende Druckkraft vernachlässigbar. Oben ist das wirksame Moment der Einfachheit halber als $G \cdot l$ angegeben; es ist selbstverständlich nötig, das durch das Eigengewicht des Hebels H erzeugte Moment mit zu berücksichtigen; das auf die Probe wirkende Biegemoment M ist also $M = G \cdot l + H \cdot l \cdot P \cdot a$.

Bei der früher festgesetzten Geschwindigkeit der Temperatursteigerung von 125–150° C in 1 h tritt, wie Nachprüfungen ergeben haben, ein unzulässig großer Unterschied zwischen der Wärme der Proben und der des umgebenden Luftbades auf. Deshalb ist die Geschwindigkeit der Temperatursteigerung auf etwa 50° C in 1 h herabgesetzt, da hierbei die Wärme der Proben nur 5–6° C hinter der des umgebenden Luftbades zurückbleibt.

Bei der Anordnung der Heizquellen ist darauf zu achten, daß die Probestäbe auf die ganze Länge gleichmäßig erwärmt werden. Die Erfahrung hat gezeigt, daß das Außerachtlassen dieser Forderung zu Unstimmigkeiten führt.

Beim Einbau mehrerer Martens-Apparate in den Heizkasten sind dünne Trennwände zwischen den einzelnen Belastungshebeln und federnde Auffangvorrichtungen anzubringen, damit beim Bruch einer Probe die Nachbarproben nicht gestört werden. Von einer Festlegung der Konstruktion des Wärmekastens und der Anzeigevorrichtung für das Absinken des Hebels ist abgesehen worden, damit etwa vorhandene Wärmeschränke benutzt werden können; jedoch ist darauf zu achten, daß die Erwärmung der Proben gleichmäßig erfolgt und die Messung der Hebelstellung nicht durch Verschiebung des Nullpunktes beim Erwärmen ungenau wird. Um das Belastungsgewicht bei den unvermeidlichen Schwankungen des Widerstandsmomentes der einzelnen Proben schnell einstellen zu können, empfiehlt sich, auf dem Hebel eine entsprechende Teilung anzubringen.

Zu A 5. **Feuersicherheit:** Die Prüfung ist der in den Errichtungsvorschriften gegebenen Definition der Feuersicherheit angepaßt worden. Die unter 45° geneigte, von der Probe seitlich etwas abgerückte Stellung des Brenners ist gewählt worden, um zu verhindern, daß bei Stoffen, die leicht erweichbare Bestandteile austropfen lassen, Verschmutzungen des Brenners vorkommen.

Die Prüfung auf Frostbeständigkeit ist in den neuen Vorschriften in Fortfall gekommen, weil eine mangelhafte Frostbeständigkeit nur durch Wassergehalt (bzw. Wasseraufnahme) bedingt ist und weil die Feuchtigkeitaufnahme durch die elektrische Prüfung in schärferer Weise erfaßt wird.

Elektrische Prüfung.

Zu B 1. Auf elektrische Festigkeit, also auf Durchschlag, werden die isolierenden Baustoffe für Apparate und Installationsmaterial nicht in nennenswerter Weise beansprucht, verlangt wird nur, daß der Isolierstoff nicht merklich leitet. In völlig trockenem Zustande isoliert eine große Anzahl von Stoffen vortrefflich; viele von ihnen werden aber durch Zutritt von Feuchtigkeit merklich elektrolytisch leitend und somit unbrauchbar. Dieses macht sich naturgemäß zuerst und am stärksten an der Oberfläche des Isolierstoffes bemerkbar; in elektrischer Hinsicht wird daher für den vorliegenden Zweck ein Isolierstoff durch einen Oberflächenwiderstand unter verschiedenen Einflüssen geeignet gekennzeichnet.

Mehrfach hat man einen nicht feuchtigkeitssicheren Isolierstoff durch einen wasserdichten Anstrich zu verbessern gesucht. Abgesehen davon, daß im Gebrauch diese dünne Haut leicht verletzt und ihre Schutzwirkung in Frage gestellt wird, soll hier der Stoff selbst und nicht der etwaige Anstrich untersucht und gekennzeichnet werden; daher ist vorgeschrieben, daß die Oberfläche der Platten vor der Prüfung abgeschliffen wird.

Der mit dem vorgeschriebenen Normalapparat gemessene Widerstand ist nun nicht rein der Oberflächenwiderstand, sondern Anteil an ihm hat auch das Innere des Isolierstoffes, da die elektrischen Feldlinien zwischen den beiden spannungsführenden Scheiden nicht nur an der Oberfläche, sondern auch im Inneren verlaufen. Die Verhältnisse beim eingebauten Isolierstoff liegen aber in der Regel ganz ähnlich. Da der Apparat und die Proben in ihren Abmessungen vorgeschrieben sind, sind die Meßergebnisse völlig eindeutig; die Bezeichnung des gemessenen Widerstandes als „Oberflächenwiderstand“ ist lediglich eine Abkürzung, die den wesentlichsten Teil nennt.

Die Probeplatte darf bei der Prüfung nicht auf eine geerdete Metallfläche gelegt werden, da hierdurch die elektrische Feldverteilung eine andere wird und der gemessene Widerstandswert zu hoch ausfallen kann.

Der Isolationswiderstand, namentlich der Oberflächenwiderstand, hat nicht einen festen Wert wie etwa der Widerstand eines Drahtes, sondern er nimmt im allgemeinen etwa umgekehrt proportional der Spannung ab. Daher mußte eine einheitliche Meßspannung vorgeschrieben werden, die nicht zu niedrig gewählt werden durfte, um einerseits nicht zu günstig erscheinende Widerstände bei geringwertigen Stoffen zu erhalten und andererseits die hochwertigsten Stoffe erkennen zu können. Die Stromstärke ist durch den vorgeschalteten Schutzwiderstand von 10000Ω auf den Höchstwert von $0,1 \text{ A}$ begrenzt, die Gleichstromquelle braucht daher nur 100 W zu leisten. Am bequemsten hierfür ist eine kleine Dynamo, deren Spannung mit der Erregung geregelt und durch deren Ausschalten auf wenige Volt herabgesetzt werden kann, so daß die Prüflinge ohne Gefahr ausgewechselt werden können. Man kann auch kleine Akkumulatoren von $0,1 \text{ A}$ Entladestromstärke, in passenden Gruppen für die Ladung unterteilt, zu einer Batterie zusammensetzen; sie müssen in regelmäßigen Zeiträumen kräftig entladen und wieder aufgeladen werden, da die geringe Entladung beim Messen nicht genügt, das Verhärten der positiven Platten zu verhindern.

Ein anderer Weg ist, eine Wechselspannung heraufzutransformieren und mit einem Gleichrichter gleichzurichten, doch ist darauf zu achten, daß die so erzeugte Gleichspannung nicht zu stark pulsiert. Ein Dreiphasen-Gleichrichter ist in dieser Hinsicht wegen der besseren Überlappung der Spannungshalbwellen wesentlich günstiger als ein einphasiger. Auf alle Fälle werden aber besondere Mittel zur Begrenzung der Pulsationen anzuwenden sein; am vollkommensten gelingt dieses, wenn man mit dem Gleichrichter eine Kapazität C aufladet. Soll bei Drehstrom von der Frequenz 50 Per/s die Pulsation der Gleichspannung von 1000 V bei einer Stromentnahme von $i \text{ A}$ durch den Oberflächenmeßapparat nicht mehr als 5 vH betragen, so muß: C in μF gleich $1,3 \times 10^{-1}$ sein. Für $i = \frac{1}{10} \text{ A}$ würde sich hiernach C zu $13 \mu\text{F}$ ergeben; nun würde man sich aber wohl an manchen Stellen damit begnügen können, die Oberflächenwiderstände, z. B. unter $1 \text{ M}\Omega$ (Grenze zwischen Vergleichszahl 1 und 2) mit geringerer Zuverlässigkeit zu messen; dann würde für $i = 0,001$ die Kapazität C $0,13 \mu\text{F}$ groß sein müssen. Für 1000 V Gleichspannung ist ein solcher Kondensator gut herstellbar. Bei Messungen von Widerständen über $10 \text{ M}\Omega$ würden dann die Pulsationen unmerklich klein.

Statt des Kondensators kann man auch einen Widerstand (nicht eine Drosselspule) einschalten, der einen nicht zu geringen Strom, z. B. $0,5$ bis 1 A , entnimmt und von dem man die Spannung zum Messen abzweigt; mit einer Drosselspule vor dem Widerstand kann man die Pulsationen des Stromes durch Widerstand schwächen. Der Betrieb der Anordnung verzehrt aber nicht unbeträchtlich Energie.

Beim Oberflächenwiderstand interessiert nicht die genaue Größe, sondern nur die Größenordnung. Ihre Stufen sind von $\frac{1}{100} \text{ M}\Omega$ ausgehend mit dem Faktor 100 fortschreitend festgesetzt und mit Vergleichszahlen bezeichnet.

Von chemischen Einflüssen macht sich der Angriff von Säuren und Alkali im Oberflächenwiderstand scharf bemerkbar. Für die abgekürzte

Prüfung sind die praktisch am häufigsten vorkommenden Einwirkungen dieser Art ausgesucht: verdünnte Schwefelsäure, wie sie sich in Akkumulatorenräumen durch das Gasen der Zellen beim Laden überall hin verbreitet, und Ammoniakdampf, der sich in Viehställen u. dgl. entwickelt. Da sich der Angriff zeitlich nicht beschleunigen läßt, mußte die Dauer der Einwirkung auf 3 Wochen festgesetzt werden.

Zu B 2. Bei Isolierstoffen, die Kunstharze enthalten, kommt es als Folge ungenügender Durchführung des Herstellungsganges vor, daß sich im Innern nachträglich Wasser abspaltet, während die Oberfläche hervorragend isoliert. Um derartige Fehler zu erkennen, ist bei der Neubearbeitung der Vorschriften die Messung des Widerstandes im Inneren zugefügt.

Zu B 3. Die Anordnung der Kohlen bei der Prüfung der Lichtbogensicherheit ist so gewählt, daß die vom Lichtbogen aufsteigenden Flammengase frei nach oben entweichen können. An einem Haltegestell ist ein Isolierstück befestigt, das zwei, eine Gerade bildende, wagerechte Rundeisenstäbe trägt; auf jedem gleitet ein Klotz, der eine um etwas mehr als 45° gegen den Stab geneigte Bohrung hat. In dieser wird der Kohlenstab festgeklemmt; die beiden Kohlen werden so weit durchgesteckt, daß ihre Ebene um etwa 60° gegen die wagerechte Ebene geneigt ist. Die Stromzuführungen werden mit Klemmschrauben an den Klötzen befestigt. Nach Zünden des Lichtbogens wird der eine Klotz mit der vorgeschriebenen Geschwindigkeit auf seinem Eisenstab entlanggeschoben, während der andere feststeht.

Die Lichtbogensicherheit wird danach beurteilt, in welchem Maß der Isolierstoff durch die Einwirkung des Lichtbogens dauernd oder vorübergehend an der Stromleitung teilnimmt. Bei der Neubearbeitung der Vorschriften sind die vier charakteristisch verschiedenen Fälle in ihrer Reihenfolge umgestellt und mit 0, 1, 2, 3 als Stufen der Lichtbogensicherheit bezeichnet. Die Gründe für das verschiedene Verhalten sind folgende:

0. Der Isolierstoff verkohlt und diese Kohle leitet auch nach dem Erkalten den Strom, so daß sie wieder zum Glühen kommt.

1. Am Isolierstoff bilden sich sogenannte Leiter II. Klasse (wie z. B. der Stift der Nernstlampe), die in glühendem Zustande gut, in kaltem jedoch nicht leiten.

2. Aus dem Isolierstoff entwickeln sich brennbare Gase, die ein Auseinanderziehen des Lichtbogens über die natürliche Länge von 22 mm gestatten, der Isolierstoff selbst jedoch wird leitend.

2. In England ist die British Electrical Allied Industries Research Association mit einem Entwurf zur Bestimmung der elektrischen Festigkeitsprüfungen von faserigen Isoliermaterialien herausgekommen.

Während unsere deutschen Prüfvorschriften nur die Feststellung des Oberflächen-Widerstandes und des Widerstandes im Innern des Dielektrikums kennen, sehen die englischen Richtlinien nur die Messung der Durchschlagsfestigkeit vor. Die Untersuchung wird am lufttrockenen Nichtleiter vorgenommen, ferner nach Vertreibung der Feuchtigkeit 1. durch Erwärmung, 2. nach Lagerung in feuchtigkeitsgesättigter Luft und schließlich 3. noch unter Tropenverhältnissen, indem der Isolierkörper bei feuchtigkeitsgesättigter Luft einer Temperatur von ca. 50° C ausgesetzt wird.

Die elektrische Festigkeit wird mit sinusförmigem Wechselstrom von 50 Per/s gemessen und in ihrem Verhalten 1. zu der Zeit der Materialbeanspruchung, 2. zur Materialstärke und 3. zu Erwärmungen bis 150° C graphisch dargestellt.

Wasseraufnahmefähige Stoffe sind nach Entfernung der schützenden Lackschicht zu untersuchen. Nur kleine Stücke, an denen die

Spannung überschlägt, prüft man unter Öl. Geschichtete Nichtleiter werden parallel zu ihren Lagen untersucht, wenn sie in dieser Weise auch im Betrieb beansprucht sind. An Hochfrequenz-Isolierstoffen wird eine Prüfung mit Hochfrequenz vorgenommen.

Wie sich die Erwärmung des Dielektrikums unter Belastung mit Wechselstrom vollzieht, wird folgendermaßen beobachtet:

Man legt den Nichtleiter mit seinen Elektroden zugleich mit einem Thermoelement zum Messen der Temperatur in eine gut wärmeisolierende Masse, z. B. Filz. In den Wechselstromkreis wird eine Batterie von 50 V Spannung und ein Milliampereometer für Gleichstrom eingeschaltet, so daß sie dauernd vom Ladestrom durchflossen werden. Zunächst hält man die Wechselstromspannung konstant und stellt das Ansteigen der Erwärmung und des Isolationsstromes fest. Wachsen beide Werte nicht mehr, wird die Wechselstromspannung erhöht. Schließlich kommt ein Punkt, wo die Erwärmung des Materials schnell zunimmt und der Isolationswiderstand stark zurückgeht, bis der Durchschlag erfolgt.

3. Die „Untersuchungsstelle für Isolierstoffe“ in Nürnberg, welche im Rahmen der Landesgewerbeanstalt errichtet wurde, um die Prüfungen der Nichtleiter in Verwendungsform und nach Verwendungszweck vorzunehmen, stellt eine überaus wertvolle Ergänzung zur Beurteilung der praktischen Brauchbarkeit von elektrischen Isoliermaterialien dar. Sie hat begonnen mit der Gütebestimmung von fertigen Griffen, Traversen und Grundplatten für Hebelschalter und hier äußerst beachtliche Feststellungen gemacht. Die Tätigkeit der Untersuchungsstelle erstreckt sich auf das Gesamtgebiet isoliertechnischer Konstruktionen.

4. Auch die Kommission für Installationsmaterial des VDE hat Leitsätze für die Untersuchung der Isolierkörper, wie sie in der Installation zur Verwendung kommen, entworfen (ETZ 1924, S. 1389). Die Genehmigung dieser Prüfvorschriften seitens der Jahresversammlung des VDE steht noch aus, weil verschiedentlich die Feststellung der geforderten Eigenschaften noch näher zu erläutern ist.

Entwurf.

Leitsätze für Untersuchung der Isolierkörper von Installationsmaterialien.

Vorwort.

Verschiedene in den „Vorschriften für Konstruktion und Prüfung von Installationsmaterial“ vorhandene Abschnitte schreiben Eigenschaften vor, ohne zu erläutern, wie diese festgestellt werden sollen. Z. B. wird Feuer-, Wärme- und Feuchtigkeitssicherheit gefordert und dem Begriffe nach bestimmt. Auch Feuersicherheit von Isolierkörpern, die mit einem Lichtbogen in Berührung kommen, und mechanische Widerstandsfähigkeit werden für notwendig angesehen. Ferner ist die Isolation eines fertigen Apparates nach Liegen in „feuchter Luft“ festzustellen.

In keinem Falle ist jedoch eine Erklärung gegeben, mit welchen Mitteln diese Sicherheiten und Eigenschaften untersucht werden sollen und wie die Prüfverfahren und Ergebnisse sein sollten. Auch über Temperaturen u. dgl.

sind nirgends Angaben gemacht worden. Es bestand daher bei vielen Prüfern die Ansicht, daß die „Prüfvorschriften für elektrische Isolierstoffe“ für die Feststellung der Eigenschaften von Isolierkörpern maßgebend seien.

Die Kommission für Installationsmaterial hat zwei Unterkommissionen, und zwar für Isolierkörper und für Prüfwesen, beauftragt, Klarheit zu schaffen und Vorschriften auszuarbeiten.

Zunächst wurde festgestellt, daß eine Prüfung nach den „Prüfvorschriften für elektrische Isolierstoffe“ nicht in Frage kommt, sondern daß die Prüfung fertiger Isolierkörper mit Hilfe anderer Methoden erfolgen müsse. Welchen Ansprüchen jeder einzelne Körper unter Berücksichtigung seines Verwendungszweckes zu widerstehen hat, sollte die Unterkommission für Isolierkörper in Tafeln festlegen. Die Aufstellung dieser Tafeln konnte aber erst erfolgen, nachdem man Klarheit über die Prüfverfahren gewonnen hatte.

Die nachstehend veröffentlichten Leitsätze, welche von der Unterkommission für Prüfwesen aufgestellt worden sind und von der Hauptkommission für Installationsmaterial angenommen wurden, werden mit Rücksicht auf die Arbeiten in der Prüfstelle des VDE und den Prüfämtern, welche Untersuchungen von Installationsmaterial zwecks Anerkennung des Prüfzeichens ausführen, veröffentlicht, ohne die Fertigstellung der Beanspruchungstafeln abzuwarten.

Der nachstehende Entwurf soll vorläufig als Grundlage für Prüfungen und gutachtliche Äußerungen dienen, bis auf Grund weiterer Arbeiten und Erfahrungen endgültige Bestimmungen getroffen werden können. Zwecks Förderung dieser Arbeiten wird gebeten, alle Erfahrungen auf diesem Gebiete, die für die Aufstellung endgültiger Vorschriften von Nutzen sein könnten, möglichst bald der Geschäftsstelle mitzuteilen. Die Herstellung der Prüfapparate hat die Firma H. Unbehauen, Berlin NO 18, Weberstraße 5, übernommen.

Leitsätze.

A. Allgemeines.

§ 1. Zweck.

Die Leitsätze sollen die „Vorschriften für die Konstruktion und Prüfung von Installationsmaterial“ hinsichtlich der Untersuchung der Isolierkörper ergänzen. Es ist beabsichtigt, sie später zu Vorschriften umzuwandeln.

§ 2. Begriffserklärung.

a) Unmittelbar isolierende Körper sind Träger spannungsführender Teile und anderer Körper, die unmittelbar mit spannungsführenden Teilen in Berührung stehen.

b) Mittelbar isolierende Körper sind Abdeckungen, Auskleidungen u. dgl., soweit sie nicht unter a) fallen.

B. Durchführung der Untersuchung.

§ 3.

Die Beschaffenheit der Isolierkörper ist nach den Errichtungsvorschriften sowie nach den „Vorschriften für die Konstruktion und Prüfung von Installationsmaterial“ auszudehnen auf:

- a) Feuchtigkeitssicherheit,
- b) mechanische Widerstandsfähigkeit,
- c) Wärmesicherheit,
- d) Feuersicherheit.

§ 4. Feuchtigkeitssicherheit.

a) Prüfvorrichtungen (Abb. 1).

Auf einem Untersatz *c* ($400 \times 400 \times 40$ mm), der etwa 20 mm hoch mit Wasser gefüllt ist, steht ein Abschlußkasten *a* ($350 \times 300 \times 300$ mm). Der für die Prüfung benutzbare Raum *b* soll 8 dcm^3 betragen. In den Ab-

Bültemann, Dielektrisches Material.

schlußkasten wird Dampf aus einem Kessel *e* von etwa 2 l Inhalt eingelassen. Der Wasserinhalt *f* soll vor dem Versuch 1 l sein. Die Rohröffnung des Bunsenbrenners *h* soll 8 mm Durchmesser betragen. Die Flammen-

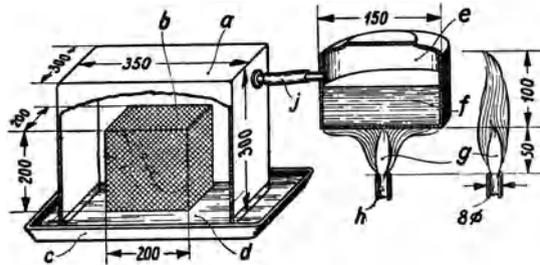


Abb. 1.

höhe *g* bei Gasdruck von etwa 50 mm soll 150 mm betragen, davon der Kern 50 mm. Zur Verbindung zwischen Kessel *e* und Abschlußkasten *a* kann ein Gummischlauch *i* verwendet werden.

b) Ausführung der Prüfung.

1. Sicherheit bei dauernd einwirkendem Wasserdampf. Der Prüfling ist in betriebsmäßig montiertem Zustande in den Abschlußkasten zu bringen, die Dampfzuführungsdauer beträgt 1 st. Die Lagerung dauert darauf mindestens 11 st ohne vorherige Änderung der Luftverhältnisse im abgeschlossenen Prüfkasten. Elektrische Prüfungen sind danach auszuführen ohne Beseitigung von Wassertropfen usw. Der Wasserrest im Kessel soll nach dem Versuch etwa 0,4 l betragen.

2. Sicherheit bei feuchter Luft. Wie unter 1., jedoch Dampfzuführungsdauer nur 6 min, Lagerung im Prüfkasten unter den gleichen Bedingungen 12 st. Wasserrest im Kessel nach dem Versuch etwa 0,96 l.

3. Sicherheit bei Zimmerluft. Wie unter 1., jedoch ohne Dampfzufuhr. Die Feuchtigkeit der Wassermenge im Untersatz genügt.

c) Prüfergebnis.

Zu 1.—3. Die Isolierkörper müssen die Prüfungen

- nach § 11 für Schalter,
- „ § 20 für Steckvorrichtungen,
- „ § 29 für Sicherungselemente,
- „ § 43 für Fassungen,
- „ § 48 für Handleuchten

und für die übrigen Installationsmaterialien sinngemäß bestehen.

Erläuterungen zu § 4.

Die vorstehend genannten Paragraphen der „Vorschriften für die Konstruktion und Prüfung von Installationsmaterial“ besagen, daß die Isolation nach mindestens 12stündigem Liegen in feuchter Luft eine Prüfspannung von 1500–2500 V je 1 min lang aushalten müssen, ohne daß ein Überschlag erfolgt. Es fehlt die Angabe über die Feststellung der Feuchtigkeit der Luft, wie sie für diese Prüfung vorgesehen werden muß. Die üblichen einfachen Methoden der Feststellung der Feuchtigkeit sind so ungenau, daß selbst bei gleichmäßiger Apparatur wesentliche Unterschiede bei der Beurteilung entstehen können. Aus diesem Grunde ist das Verfahren derart vereinfacht worden, daß zu der jeweiligen Untersuchung eine gewisse Menge Wasser verdampft werden muß.

Die Gleichheit der Versuche ist aber nur dann gewährleistet, wenn

1. die Volumina den vorgesehenen entsprechen,
2. die zu verdampfenden Wassermengen den oben angegebenen entsprechen,
3. das Volumen der gemeinschaftlich zu untersuchenden Körper nicht größer ist wie oben angegeben.

Es könnte sonst der Fall eintreten, daß die Oberfläche der zu untersuchenden Körper so groß wird, daß ein ungenügender Feuchtigkeitsniederschlag, bezogen auf die Flächeneinheit, entsteht. Die Prüflinge sollen nach Lagerung im Abschlußkasten ohne Entfernung der Oberflächenfeuchtigkeit der in den genannten Paragraphen vorgesehenen Prüfspannung unterworfen werden.

§ 5. Mechanische Widerstandsfähigkeit.

Die Prüfung der mechanischen Widerstandsfähigkeit ist den praktischen Beanspruchungen entsprechend auszuführen. Daher ist zu unterscheiden:

- I. Prüfung der Griffe von Handleuchtern,
- II. Prüfung der Kappen für für Drehschalter und Steckdosen,
- III. usw.

(Hs.)

I. Prüfung der Griffe von Handleuchtern.

a) Prüfvorrichtung (Abb. 2).

Ein Gestell wird mit einer eisernen winkelförmigen Anschlagschiene *d* versehen. In 1000 mm Abstand von dieser Anschlagschiene befindet sich ein Drehpunkt *e*, an dem durch Klemmung od. dgl. die Zuleitung befestigt ist. Ferner ist eine Auslösevorrichtung *f* vorhanden, die ein Fallenlassen des Handleuchters ohne Stoßwirkung ermöglicht. Die Aufschlagschiene soll an der Anschlagstelle einen Krümmungsradius von $r = 5 \text{ mm}$ haben.

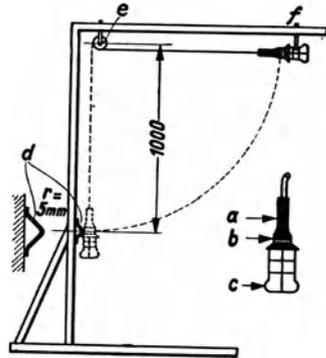


Abb. 2.

b) Ausführung der Untersuchung.

Der Handleuchter ist betriebsmäßig mit entsprechend langer Zuleitung zu installieren (Fassung anschließen, Zugentlastung anbringen). Die Zuleitung ist an dem Drehpunkt zu befestigen. Es sind drei Schläge auszuführen, und zwar derart, daß beim ersten Schläge das Aufschlagen im Punkte *a*, das zweitemal im Punkte *b* und das drittemal im Punkte *c* erfolgt.

c) Prüfergebnis.

Der Griff des Handleuchters muß diesen drei Schlagversuchen ohne Beschädigung widerstehen. Eindruckstellen gelten nicht als Beschädigung.

Erläuterungen zu § 5 I.

Die Art der Prüfung wurde mit Rücksicht auf die im Betrieb auftretenden Beanspruchungen gewählt, indem die Werkstoffbeschaffenheit diesen entsprechen muß. Das Gewicht des Handleuchters einschließlich des Schutzkorbes und der Zubehörteile sowie der Schwerpunkt finden Beachtung. Die vorgesehene Fallhöhe und die winkelförmige Aufschlagschiene ermöglichen eine eingehende Prüfung der zu untersuchenden Konstruktionen (s. auch ETZ 1923, S. 1030).

II. Prüfung der Kappen für Drehschalter und Steckdosen.

a) Prüfvorrichtung (Abb. 3).

Ein Fallkörper im Gewicht von 500 g wird in einem Prüfgestell *a* durch eine Einstellvorrichtung *d* auf einer Gleitstange *b* für diejenige Fallhöhe eingestellt, welche sich aus folgender Rechnung ergibt:

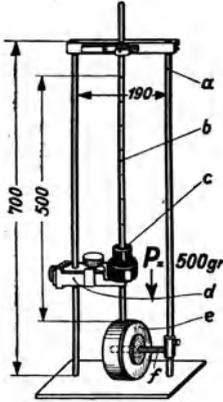


Abb. 3.

$$\frac{\text{Gewicht der Kappe in g}}{5} = \text{Fallhöhe in cm.}$$

Die zu prüfende Kappe *e* wird durch eine Vorrichtung aus Holz od. dgl. (*f*) in der Versuchslage festgehalten.

b) Ausführung der Prüfung.

Der Fallkörper ist aus der errechneten und eingestellten Fallhöhe einmal auf die Kappe fallen zu lassen.

c) Prüfergebnis.

Die Kappen sollen dieser Prüfung standhalten, ohne Sprünge oder Eindrücke zu zeigen.

Erläuterungen zu § 5II.

Bei diesem Versuch wird das Fallen der Kappe, wie es bei der Montage vorkommen kann, berücksichtigt. Alle anderen Zerstörungsmöglichkeiten konnten nicht erfaßt werden, da die Beanspruchungsmöglichkeiten am montierten Schalter verschiedenartig sind.

Die Prüfvorrichtung wiederholt das Fallen der Kappe aus 1 m Höhe und ersetzt die unbestimmbare Fallrichtung der Kappe durch einen gerichtet fallenden Körper, dessen Gewicht für Kappen bis zum Eigengewicht von 250 g betragen soll. Der Aufschlag des Gewichtes soll derart erfolgen, daß der Fallkörper die Oberfläche der Kappe axial berührt und zwar auf der gesamten zur Verfügung stehenden Höhe der Kappe. Durch Umrechnung des Eigengewichtes der Kappe unter Berücksichtigung des Fallgewichtes von 500 g ergibt sich die Formel:

$$\frac{\text{Gewicht der Kappe in g}}{5} = \text{Fallhöhe in cm.}$$

Zur leichteren Ablesung der Fallhöhe ist die Gleitstange der Vorrichtung auf dem Kappenrand aufzusetzen und die Fallhöhe an der Skala auf dieser Stange abzulesen. Um das Fortrollen der Kappe zu verhindern, soll dieselbe durch eine Vorrichtung gehalten werden. Z. B. kann ein entsprechend ausgearbeiteter Holzklötzchen, welcher die Kappe von unten in höchstens ein Drittel Umfang umfaßt, zu diesem Zweck verwendet werden. Der Aufschlag soll an einer ungeschwächten Stelle der Kappenwand erfolgen.

§ 6. Wärmesicherheit für feste Isolierkörper.

a) Prüfvorrichtung.

Die Prüflinge sind in einem Thermostat (Abb. 4), der aus Grundplatte, Heizvorrichtung und Abdeckkappe besteht, unterzubringen. Sie sind ohne mechanische Veränderung ihrer Form auf besonderen Vorrichtungen zu befestigen nach Abb. 5–7 und mit einer Belastungsvorrichtung zu versehen. Das Belastungsgewicht soll dem Eigengewicht gleich sein, mindestens aber 100 g betragen.

b) Ausführung der Prüfung.

1. Sicherheit bei Wärmestufe 250: Die Temperatur ist stündlich um 50° zu steigern. Endtemperatur 250°.

2. Sicherheit bei Wärmestufe 150: Wie unter Wärmestufe 250. Endtemperatur 150°.
3. Sicherheit bei Wärmestufe 100: Wie unter Wärmestufe 250. Endtemperatur 100°.
4. Sicherheit bei Wärmestufe 70: Wie unter Wärmestufe 250. Endtemperatur 70°.
5. Sicherheit bei Wärmestufe 50: Wie unter Wärmestufe 250. Endtemperatur 50°.

c) Prüfergebnis.

Eine merkliche allgemeine Formveränderung darf bei den Prüfungen nicht eintreten. Die zulässige Durchbiegung am Belastungshebel muß kleiner als 3 mm sein.

Erläuterungen zu § 6.

Die bisher gebräuchliche Untersuchung von mechanischer Sicherheit bei Wärmeeinwirkung auf Isolierteile erfolgte derart, daß ein Körper in einen Thermostaten gebracht wurde, dessen Temperatur bis auf die notwendige Höhe gebracht wurde (innerhalb der vorgesehenen Zeit). Nach Erreichung dieser Temperatur wurde der Isolierkörper aus dem Thermostaten herausgenommen und durch Eindrücken von Schraubenziehern und ähnlichen Werkzeugen untersucht, ob die Oberfläche des Körpers sich deformieren ließ. Das Ergebnis war von sehr vielen Zufälligkeiten abhängig; diese Zufälligkeiten werden ausgeschaltet. Die Körper bleiben bis zur Beendigung des Versuches im Thermostaten; das Ergebnis wird im Thermostaten ermittelt.

Die Form des Thermostaten selbst ist an sich gleichgültig. Eine einfache Form des Apparates für Erhitzung bis etwa 180°, welche zuverlässig arbeitet und billig herzustellen ist, ist in Abb. 4 wiedergegeben.

Es bedeuten:

- a die Abdeckkappe des Thermostaten,
- b ein Thermometer,
- c die Belastungsvorrichtung,
- d die Heizvorrichtung, und
- e die Grundplatte.

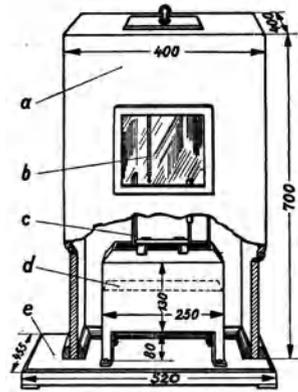


Abb. 4.

In diesen Thermostaten werden die zu untersuchenden Prüflinge z. B. nach den Abb. 5, 6 und 7 eingesetzt. In Abb. 5 ist eine Belastungsvorrichtung einer Kappe für Strecker oder Schalter dargestellt.

Es ist:

- a die Heizvorrichtung des Thermostaten,
- b ein Tragwinkel,
- c eine Meßvorrichtung,
- d der zu untersuchende Isolierkörper,
- e die Belastungsvorrichtung,
- f ein Thermometer und P das Belastungsgewicht.

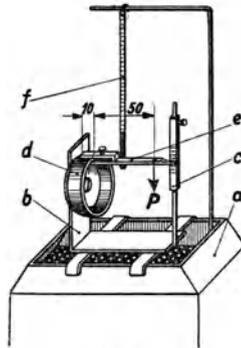


Abb. 5.

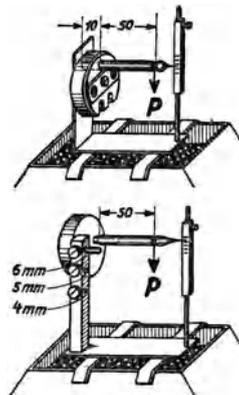


Abb. 6.

In Abb. 6 sind ähnliche Vorrichtungen für Sockel

von Steckern und Schaltern, Fassungen u. dgl. sowie für Stecker dargestellt.

In Abb. 7 ist eine Vorrichtung zur Prüfung von Handleuchtergriffen wiedergegeben. Es ist:

- a der Handleuchtergriff,
- b die Haltevorrichtung desselben,
- c die Meßvorrichtung,

P deutet auf das Belastungsgewichthin, welches an Stelle von Schutzglas und Schutzkorb anzuwenden ist, falls dieselben bei der Prüfung nicht vorhanden sind. Im allgemeinen genügt ein Gewicht von 500 g für die üblichen Handleuchter.

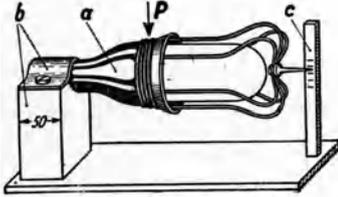


Abb. 7.

Voraussetzung für die Untersuchung ist, daß keinerlei Formänderung vor oder während des Versuches vorgenommen wird, z. B. dürfen keine Löcher zur Befestigung von Prüfmitteln angebracht werden. So soll z. B. eine Kappe für Schalter oder Steckdose vermittels ihrer normalen Öffnungen an dem Haltebügel der Einrichtung befestigt werden. Auf den Rand

einer Kappe wird eine Klemmvorrichtung aufgebracht, welche gleichzeitig Träger des Gewichtes ist. Die Hebelanordnung des Gewichtes ist im Verhältnis 1 : 5 zu treffen, also bei 10 mm Länge der Klemmung auf der Kappe ist das Gewicht 50 mm vom Kappenrande entfernt anzubringen. Das Gewicht *P* soll gleich sein dem Gewicht der Kappe oder des betreffenden Prüflings, mindestens aber 100 g. Die Untersuchung von Sockeln, Steckern oder Handleuchtergriffen erfolgt in gleicher Weise wie in den Abb. 5—7 dargestellt.

Daß die Prüfung eine merkliche Formveränderung nicht ergeben darf und die Durchbiegung der Belastungshebel kleiner sein muß als 3 mm, ist in den Leitsätzen bereits angeführt worden.

Vorstehende Temperaturen der Wärmestufen gelten jedoch nur für Verwendung in normal geheizten Räumen. Die Anwendung in heißen Räumen setzt andere noch festzulegende Temperaturen voraus.

Anmerkung: Zurzeit sind folgende Temperaturen zur Untersuchung der Wärmesicherheit nachfolgender Teile üblich:

- | | |
|--|------|
| 1. Schutz- und Abdeckkappen | 70° |
| 2. Träger spannungsführender Teile | 100° |
| 3. Handleuchtergriffe | 150° |
| 4. Teile für Sicherungselemente | 250° |

Es wird zurzeit untersucht, ob Schutzkappen, welche eine Wärmesicherheit von 50° haben, den allgemeinen Ansprüchen genügen.

§ 7. Wärmesicherheit von Vergußmassen.

Vergußmasse dient zum Abdecken und nicht zur Befestigung spannungsführender Teile.

a) Prüfvorrichtung (Abb. 4).

Die Prüflinge sind im Thermostaten in der Gebrauchslage unterzubringen.

b) Ausführung der Prüfung.

Die Temperatur ist innerhalb einer Stunde auf 70° zu steigern.

c) Prüfergebnis.

Bei diesem Versuch darf eine Lageveränderung nicht eintreten.

Erläuterungen zu § 7.

Vergußmassen sollen den betriebsmäßigen Beanspruchungen standhalten, ohne eine Lageveränderung anzunehmen. Zu diesem Zweck werden vergossene Körper, z. B. Schalter, Steckdosen und Sicherungselemente, in einen Thermostaten gebracht und dort in der Gebrauchslage aufgestellt. Die Temperatur im Thermostaten soll innerhalb einer Stunde auf 70° gesteigert werden. Nach dieser Zeit darf zwar eine Erweichung der Vergußmasse, nicht aber eine Lageveränderung eintreten. Paraffinhaltige und ähnliche Vergußmassen sind aus diesem Grunde nicht verwendbar.

§ 8. Feuersicherheit.

Prüfbestimmungen sind in Vorbereitung.

5. Da, wie allgemein bekannt ist, die Preßisolierstoffe in Starkstromanlagen, also bis 750 V Betriebsspannung, teilweise in einer unverantwortlich minderwertigen Beschaffenheit auf den Markt gebracht wurden, sind die im Zentralverband der Deutschen Elektrotechnischen Industrie e. V. unter Gruppe IV (gummifreie Isolierstoffe) der Fachgruppe 19 vereinigten Fabriken (Vors. Dr. Schiff) zusammengetreten und haben zu ihrem Schutz von sich aus eine Klassifizierung ihrer Erzeugnisse vorgenommen. Es sind in Erkenntnis dessen, daß das thermische Verhalten sehr wichtig ist, ferner die Biegefestigkeit des Fabrikat am weitgehendsten charakterisiert, folgende 10 Klassen vorgesehen (ETZ 1924, Heft 27):

Klasse	Wärmebeständigkeit	Biegefestigkeit
I	mind. 150°	mind. 500 kg/cm ²
II	„ 150°	„ 350 kg/cm ² , unter 500 kg/cm ²
III	„ 150°	„ 200 kg/cm ² , „ 350 kg/cm ²
IV	„ 150°	„ 150 kg/cm ² , „ 200 kg/cm ²
V	„ 150°	„ 150 kg/cm ²
VI	„ 100°, unter 150°	„ 350 kg/cm ²
VII	„ 65°, „ 100°	„ 250 kg/cm ²
VIII	„ 45°, „ 65°	„ 125 kg/cm ²
IX	„ 45°	„ 125 kg/cm ²
X		funkensichere Isolierstoffe.

Solche Isolierstoffe, die zur Verwendung unter besonderen Bedingungen bestimmt sind, z. B. zur Herstellung von Isolierteilen, die betriebsmäßig einer Spannung von mehr als 750 V ausgesetzt sind, die in außergewöhnlicher Weise auf Schlag beansprucht werden oder die chemischen Einflüssen widerstehen müssen, sind als Sonderpreßmassen anzusehen.

Die Feststellung der Klasse geschieht auf Grund der Ergebnisse nach den vorher angeführten Prüfungsvorschriften für die gekürzte Untersuchung elektrischer Isolierstoffe. Ein eingepreßtes geschütztes Zeichen



welches dann noch die Kennnummer der Firma und die Klassennummer erhält, sichert die Qualität des Isolierstückes. Das Staatliche Materialprüfungsamt in Berlin-Dahlem ist als Nachprüfungsstelle eingesetzt.

Die Liste I₁ Normale Preßmassen der Vereinigten Isolatorenwerke A. G. Berlin-Pankow ist auf Grund dieser Vereinbarungen hergestellt.

Auf diese Weise wird dem Verbraucher ein Nichtleiter mit gewährleistet Eigenschaften in die Hand gegeben. Bekannte Isolierpreßmassen sind eingeordnet, wie aus der nachstehenden Tabelle (ETZ 1925, Heft 45) zu erkennen ist:

22	Elektrotechnische Fabrik G. m. b. H., Bebra	—	—	—	—	Rulit 1 Rulit 2	—	—	—	Bebrtit 1	—
44	Friedrichswerk G. m. b. H., Schöppenstedt	—	—	—	—	Roderit- mate- rial X	—	Roderit- mate- rial V	—	—	—
34	Gummitfabrik Westend G. m. b. H., Berlin-Stiemensstadt	Eshalit E 84 Eshalit E 87	—	—	Eshalit E 59	Eshalit E 61	—	Eshalit E 81	—	Eshalit E 82	Eshalit E 90
40	Isolawerke A.-G., Birkesdorf bei Dützen	—	—	—	Fermit Ia Fermit III	—	—	—	Luxit V	—	Fermit I extra
24	Gebrüder Merten, Gummersbach (Rheinl.)	—	—	—	Merit 3	—	—	—	Merit 8	—	—
26	Pressolith-Kunstmassenwerke m. b. H., Nürnberg (Ostbahnhof)	Stema- lith 1	—	Stema- lith 2	Stema- lith K 2 Stema- lith K 3	—	Stema- lith 6	Stema- lith 7	Stema- lith 8	—	Stema- lith K 4
43	Rheinisch-Westfälische Sprengstoff- Aktien-Gesellschaft, Celluloidfabrik Troisdorf	—	—	—	Gum- mon 25 Gum- mon 26	Gum- mon 12	—	—	Gum- mon 180	—	Gum- mon C
32	H. Röttmiller A.-G., Berlin	—	Resistan rotbraun	—	Resistan hell	Resistan braun Resistan schwarz	—	Hello- sit A	Hello- sit B	—	Resistan E
25	Süddeutsche Isolatorenwerke G. m. b. H., Freiburg i. Br.	Ricolit 7	—	—	Ricolit 8	—	Ricolit 6	Ricolit 5	Ricolit 2 Ricolit 3	—	—
27	Vakuum-Preßgut Gesellschaft m. b. H., Häbelschwerdt (Schles.)	Qual. M. V. A.	—	—	Qual.150	Qual. 75	Qual. M. V. H.	Qual. E a a	—	—	—
31	Vereinigte Isolatorenwerke Aktien- gesellschaft, Berlin-Pankow	Ambroin BK	Margolit SEZ	—	Margolit REZ	Margolit EZ 26	—	—	Ambroin G Ambroin WAP	—	Ambroin NFW
41	Westfälisch-Anhaltische Sprengstoff- Aktien-Gesellschaft, Berlin	Wasagit Ba 1	Wasagit Ba 2	—	Wasagit A 3 Wasagit H	Wasagit A 4	—	—	Wasagit P 2	—	Wasagit W
33	Wolff & Co., Walsrode	—	Kiwit IV	—	Kiwit VIII	—	—	—	—	—	—

XIII. Die Imprägnierung der Faser.

Eigenschaft und Verhalten von Hanf, Jute, Baumwolle, Nessel, Kunst- und Naturseiden, Zellstoff, Asbest und anderen Fasern, welche isoliertechnisch Bedeutung besitzen, sind aus Schrift und Abbildungen der Spezialliteratur zu entnehmen, ebenso ihre Gewinnung, Aufbereitung und Verarbeitung zu Geweben, ferner die Untersuchungsmerkmale und Methoden zur Erkennung und Quantitätsbestimmung in Fertigfabrikaten.

1. Um den Vorgang der Erzielung elektrischer Festigkeit in Fasern, Fasergebilden und faserhaltigen Massen am leichtesten zu übersehen und die hier notwendigen Maßnahmen am sichersten zu treffen, stellt man sie sich zweckmäßig in millionenfacher Vergrößerung vor. Es ergibt sich dann ein Bild, welches die ungleichförmige Struktur, die tausendfachen groben und feinen Spitzen, das vielseitige Netz von schmalen und breiten Kanälen, die verschiedenartigen Einschlüsse usw. in greifbarer Form erkennen läßt. Die so gewonnene Anschauung zwingt direkt dazu, in diesen mikroskopisch kleinen Ausmessungen und Räumen die Erfahrungen in Anwendung zu bringen, welche uns als Grund der früheren Ausführungen für die Herstellung elektrischer Hochspannungsisolierstoffe zur Verfügung stehen, also z. B. das richtige Bindemittel auszusuchen und Fabrikationsprozesse zu ersinnen, wie die dielektrische Verbindung zwischen Faser und Bindemittel am vollkommensten herbeizuführen ist.

2. Bei der mikroskopischen Betrachtung von faserigen Stoffen wird man gewahr, daß diese von unendlich vielen feinen Röhrenchen durchsetzt sind, welche die Eigenschaft besitzen, stark Feuchtigkeit aufzusaugen und ihr Inneres sowie ihre Oberfläche mit Wasser zu durchsetzen. Man hat nicht nötig, zu diesem Zweck die Fasern, das Gewebe oder das Papier direkt in eine Flüssigkeit zu bringen. Schon der Wasserdampf, welcher sich in der Luft befindet, wird begierig von den haarfeinen Kanälchen aufgenommen. Es stellt sich ein Gleichgewicht zwischen dem Feuchtigkeitsgehalt der Umgebung und dem Fasermaterial her, welches sich jeweilig in kurzer Zeit mit dem Dampfgehalt der Luft ändert.

Die Erscheinung, welche hier auftritt, nennt man Kapillarität oder Haarröhrenchenwirkung. Wird z. B. eine offene Glasröhre von sehr kleinem lichten Durchmesser mit ihrem unteren Ende in Wasser getaucht, so stellt sich die Oberfläche in dem Röhrenchen höher ein als der Spiegel der die Röhre außen umgebenden Flüssigkeit. Die molekularen Kräfte der Oberflächenschicht erzeugen eine Spannung, welche sich mit derjenigen einer gestrafften Haut vergleichen läßt. Sie zeigt das Bestreben, ihre Fläche dadurch so klein wie möglich zu machen, daß sie sich eng an das Rohrinne anlehnt, die Anziehungskraft der Glaswände wird also größer wie die Wirkung, welche die Schwerkraft ausübt. Um zum Gleichgewichtszustand zu kommen, muß daher im Fall Glas/Wasser das Wasser im Glaskanälchen steigen. Die Höhe der Säule ist dem Durchmesser des Röhrenchens umgekehrt verhältnis-

gleich, der Meniscus besitzt eine konkave Form. Hat das Glasrohr z. B. einen Durchmesser von 2 mm, beträgt die Steigerung des Wassers 15 mm. Ist er 1 mm, steigt es 30 mm, ist er 0,5 mm, beträgt die Steigerung 60 mm usw. Alkohol und leichtflüssige Kohlenwasserstoffe zeigen im Glasröhrchen ungefähr die Hälfte dieser Kapillarität.

Es gibt aber Flüssigkeiten, die vom Material des Haarröhrchens nicht benetzt werden, z. B. Quecksilber nicht von Glas. Die Kohäsion des Quecksilbers ist hier größer wie die Adhäsion der Glaswand. Es findet daher kein Steigen, sondern ein Fallen der Oberfläche des Rohrinne unter den Spiegel der umgebenden Flüssigkeit statt. Der Meniskus hat eine konvexe Form.

Die eben angeführte Wirkung des Abstoßens der im Kapillarröhrchen befindlichen Flüssigkeit durch das Material des Röhrchens findet z. B. statt, wenn die Wände harz- oder fetthaltig sind. Mithin ist hier der Vorgang, welchen man als Benetzung bezeichnet, nicht möglich. Dieser Fall kommt bei der Herstellung von Nichtleitern häufig vor, so daß man ihm deshalb Beachtung zu schenken hat.

3. Daß eine elektrische Spannungsdifferenz auf die im Kapillarröhrchen eingeschlossenen Flüssigkeiten Wirkungen ausübt, wissen wir schon lange, u. a. durch das Lippmannsche Kapillarelektrometer. Hier ist das Haarröhrchen aus Glas, es enthält Quecksilber und verdünnte Schwefelsäure. Quecksilber nimmt beim Eintauchen in Schwefelsäure ein positives Potential an. Gelangen weitere positive Ladungen von außen auf die Oberflächenschicht des Quecksilbers, so wird die Oberflächenspannung verkleinert, weil die Abstoßung durch die beiderseitigen positiven Ladungen den Kapillarkräften entgegenwirkt, welche nach den vorherigen Ausführungen bestrebt sind, eine Verminderung der Oberfläche herbeizuführen. Die Quecksilbersäule bewegt sich daher in steigender Richtung. Umgekehrt fällt sie, wenn Elektronenzufuhr erfolgt.

4. Die unter der Wirkung des elektrischen Feldes in Fasern auftretenden Erscheinungen hat man künstlich nachzuahmen versucht. So wurden enge Glasröhren mit Wasser, bekannten Lösungsmitteln, Kohlenwasserstoffen, Öl, suspendierten Teilchen, Emulsionen u. a. m. gefüllt und unter Gleichstrom und Wechselstrom beobachtet.

Unter Berücksichtigung des bisher Bekannten ist nicht viel Neues dabei herausgekommen. Denn man wußte bereits, daß Wechselstrom bei Vorhandensein von Spitzenelektroden durch Drosselung der positiven Wechsel zu einem Teil in Gleichstrom übergeht, welcher sich dem Wechselstrom überlagert, ferner, daß durch Zuführung elektrischer Ladungen die Oberflächenspannung geändert wird, daß sich die in den Haarröhrchen enthaltenen Lösungen und Suspensionen, Emulsionen u. dgl. den Gesetzen der Elektrolyse und Elektroosmose fügen. Die Tatsache, daß erst bei einer bestimmten Felddichte hohe Erwärmung, Zersetzung, Verdampfung, Ozon- und Salpetersäurebildung und die hieraus entstehenden Durchschläge zustandekommen, erklärt sich in einfacher Weise.

5. Für die Fabrikation von Hochspannungsnichtleitern besteht die Notwendigkeit, daß vor der Verarbeitung mit den hierfür ausgesuchten

isolierenden Bindemitteln sämtliches Wasser aus den Fasern und den sonstigen Bestandteilen herauszuholen ist.

Diejenige Methode, welche sich im vorliegenden Fall am wirksamsten erweist, aber keineswegs überall angewendet wird, besteht darin, daß man z. B. ungeleimtes Papier erst bei niederer Temperatur unter Luftleere trocknet, dann das so vorbehandelte Papier in wasserfreies Benzol oder ein ähnliches Lösungsmittel bringt, unter Umständen mit kleinen Mengen eines die Faserporen auskleidenden wasserabweisenden Mittels. Den Siedepunkt des Wassers überschreitet man im Hinblick auf die vorhandene Verzögerung in der Verdampfung um 10—20° und bewegt die Papierbahn vorsichtig in der heißen Flüssigkeit.

Schon jetzt einen imprägnierenden Zusatz zu nehmen, der seiner Menge nach gering ist, hat folgende Vorteile: Geringfügige Zusätze gelangen besser in die feinsten und tiefsten Kanälchen der Faser, außerdem wird dem Lösungsmittel die Möglichkeit gegeben, bei dem feinen Überzug, welcher sich auf den Faserwänden niederschlägt, leicht austreten zu können. Ebenso ist ein günstiges Moment, daß die Kanälchen durch zu viel Imprägniermasse noch nicht verstopft werden, infolgedessen auch beim Absaugeprozeß im Vakuum das Lösungsmittel bequem austreten lassen. Mechanisch wird das Papier durch die wenn auch geringe Lackierung mit einem Bindemittel immerhin verbessert.

Die Beschaffenheit der isolierenden Masse, mit welcher man die Fasern verstopfen will, ist entscheidend für die dielektrischen Eigenschaften. Die Faser selbst bestimmt lediglich das mechanische Verhalten.

6. Aber erst die richtige Verarbeitung von hochwertigem Bindemittel mit dem Faserstoff ergibt das betriebssichere Isoliermaterial. Große Mengen von Hochspannungsnichtleitern werden in der Weise hergestellt, daß man lufttrockenes Papier benutzt und dieses in Lackiermaschinen meist einseitig mit Lack versieht, indem das Lösungsmittel desselben, z. B. Alkohol, infolge Führung der Papierbahn über heiße Walzen verdampft wird. Dieses Lackpapier wickelt man darauf in Spezialmaschinen auf Stahldorne auf. Elektrisch oder mit Gas geheizte Stahlwalzen, welche außer Hitze noch Druck auf das Papier übertragen, schmelzen den Lack und kleben die Lagen zusammen, so daß ein aus vielen Schichten Papier/Lack/Papier/Lack usw. bestehender mechanisch sehr widerstandsfähiger Körper gebildet wird. Als Klebemittel wird hier Schellack benutzt, in letzter Zeit aber vor allem auch das synthetische Harz „Bakelite“.

Bakelite-Erzeugnisse werden in größtem Maßstabe von vielen bedeutenden Fabriken angefertigt und finden eine vielseitige Verwendung im Transformatorenbau und in der gesamten Hochspannungstechnik, jedoch nicht an Stellen, wo sie den Witterungseinflüssen ausgesetzt sind.

Die Schwächen dieser leicht bearbeitbaren zähen Hartpapiernichtleiter, welche auch durch Pressen von Lagen in heißen Matrizen entstehen, liegen in ihrem Schichtenaufbau. Sie besitzen längs der Lagen nur 10 vH ihrer elektrischen Festigkeit wie quer dazu. Ferner haftet ihnen der Nachteil an, daß Glimmwirkungen, welche durch hohe Felddichten an scharfen Stellen der Armaturen entstehen können,

die Papiersubstanz oxydieren und durch eine leitende Kohlebahn die Zerstörung der Isolation und des Isolators einleiten. Eine Behandlung mit Öl und Lacken, welche man dem gewickelten fertigen Hochspannungs-Hartpapierisoliertkörper zuteil werden läßt, pflegt die Verwendbarkeit zu erhöhen. Die Verschiebbarkeit beträgt 3,5—5. Ein schichtenfreies Material, welches bei kleinen und großen Zylindern an die Stelle dieser aus Wickellagen bestehenden Papiernichtleiter tritt, bedeutet isoliertechnisch einen Fortschritt.

7. Was eben im besonderen über Papier gesagt ist, gilt in derselben Weise von Dielektrizis aus anderen Faserstoffen. Das Streichen mit Lacken und Lösungen kann wohl die Deckschicht widerstandsfähig machen, aber nicht die ganze Masse. Es wird nur ein oberflächlicher Zustand geschaffen, der deshalb bedenkliche Seiten hat. Ein großer technischer und isoliertechnischer Fortschritt ist die Imprägnierung durch den ganzen Stoff hindurch. Man sucht sie dadurch vorzunehmen, daß elektrisch nicht leitende Kohlenwasserstoffe, künstliche und natürliche Harze und ähnliche Körper im Schmelzzustand die Poren der Faserstoffe durchsetzen. Der vollkommenste Fall besteht darin, daß man sich hier der durch Erwärmung leicht flüssig werdenden Körper bedient. Leicht durchzuführen ist eine vollkommene Tränkung aller Poren und Kanälchen von außen her durch Eintauchen der erwärmten Fasermassen in die Schmelzen nicht. Es entstehen hier deshalb Schwierigkeiten, weil die Schmelzen ein zu geringes Penetrationsvermögen besitzen. Verdünnt man die Schmelzen, gestaltet sich der Vorgang so, daß der gelöste Stoff vorzugsweise die Oberflächenschicht durchsetzt. In die inneren Teile wird das zugesetzte leichtbewegliche Lösungsmittel hineinfltriert. Diese Verhältnisse sind natürlich unerwünscht und führen nicht zum Ziel. Da die Schmelzkörper in den meisten Fällen nicht einheitlich zusammengesetzt sind, findet beim Einsickern der Schmelzen in die Fasermasse auch ohne Lösungsmittel eine Trennung der Bestandteile statt, welche isoliertechnisch nachteilig wirkt. Hochspannungsnichtleiter stärkerer Dimensionen herzustellen, ist infolgedessen nicht möglich.

Dielektrisch ganz vorzügliche Tränkmittel sind die Paraffine, welche bei der Destillation von Holz, Torf, Braunkohle, bituminösen Schiefen, Baku-Petroleum u. a. gewonnen werden. Sie bestehen im reinen Zustande in Form blättriger Kristalle der Hauptsache nach aus Grenzkohlenwasserstoffen C_nH_{2n+2} und besitzen Siedepunkte von über $300^{\circ}C$. In Äther, Schwefelkohlenstoff, Benzin und Alkohol sind sie löslich. Ihr Schmelzpunkt liegt zwischen 30° und 90° . Mit Harzen, Fetten, Ölen, Stearin, Wachs sind sie in jedem Verhältnis zusammen schmelzbar. Natürliche Paraffine sind das Ozokerit, welches hauptsächlich aus Galizien und Rumänien stammt, und das Neftigil aus der Bakuer Petroleumgegend. Die Reinigung von harzigen Bestandteilen wird mit konz. Schwefelsäure vollzogen und dann noch eine zweite Destillation vorgenommen. Zeresin ist Ozokerit, welches später gebleicht wird.

Die Paraffine sind stark wasserabweisend. Die spez. Gewichte sind geringer wie das von Wasser, ihre elektrische Festigkeit ist bedeutend. Die Dielektrizitätskonstante zeigt die sehr günstige Zahl 2.

Isoliertechnisch bemerkenswert ist der Umstand, daß die Durchschlagswerte dieses sicher an und für sich elektrisch sehr festen Materials stark streuen. Wahrscheinlich drücken die beim Abkühlen sich voneinander scheidenden kristallinen und amorphen Gebilde die Homogenität der Masse herab. Es war früher vom Schwefel schon in ähnlicher Weise berichtet. Wahrscheinlich wird auch eingeschlossene Luft an diesen Unregelmäßigkeiten mit beteiligt sein. Ebenso ist ziemlich sicher, daß Feuchtigkeit in den gewöhnlichen Paraffinschmelzen zurückgehalten wird.

Wurde bei 54° C schmelzbares Paraffin zur Hälfte mit Zeresin, das bei 72° C flüssig wird, zusammengeschmolzen, so hat sich nach den Feststellungen des Telegraphentechnischen Reichsamtes ergeben, daß der Leistungsfaktor dieser erkalteten Mischung nicht, wie man annehmen könnte, zwischen den an Paraffin und Zeresin vorher festgestellten Werten liegt, sondern daß dieser, welcher den Verlusten verhältnismäßig ist, sich als größer erweist wie bei dem der Bestandteile. Die Zuhilfenahme eines besseren Materials hat mithin die durch Zusammenschmelzen sich ergebende Masse dielektrisch verschlechtert. Zweifellos ist das Material ungleichmäßiger geworden durch unvollkommene Lösungs- und Kristallisationsvorgänge.

Schering und Schmidt benutzten Paraffin, um damit Untersuchungen über die dielektrischen Verluste anzustellen. Die reine Paraffinsubstanz zeigt diese in verhältnismäßig geringem Maße. Sie brachten in die Schmelze fein verteilten Koks, Graphit und andere Stoffe mittlerer Leitfähigkeit und von abweichender Dielektrizitätskonstanten und fanden, daß sich durch die Einführung der Fremdkörper in das Paraffin die Erscheinung von Nichtleitern mit ausgeprägter dielektrischer Nachwirkung einstellt. Die bisher nicht veröffentlichten Forschungen hierüber harren noch der Weiterführung.

Sättigt man entfeuchtete Fasermasse, wie Papier, Baumwolle Asbestgewebe u. a. mit Paraffin, so erreicht man ein Höchstmaß von elektrischer Festigkeit, wenn man einen starken mechanischen Druck auf das getränkte Fasermaterial ausübt, während sich das Paraffin noch im Schmelzzustande befindet. Die Abkühlung hat unter Druck zu erfolgen.

Die Nachteile von Paraffinpapier und Paraffinbändern beruhen in ihrer geringen Widerstandsfähigkeit gegen Erwärmung und in dem Mangel an Klebfähigkeit. Es findet dadurch eine erhebliche Beschränkung in der Verwendung dieser dielektrisch vorzüglichen Fabrikate statt. Sie sind im übrigen gasdicht und durch chemische Einflüsse schwer veränderlich.

8. Wachs, künstliche und natürliche Harze, Trockenöle, Kohlenwasserstoffe, Firnisse, Asphalte, Peche, Fette usw. werden in ausgedehntem Maße als isolierende Bindemittel benutzt und haben teilweise gegenüber Paraffin den Vorzug einer bedeutenden Wärmefestigkeit und Klebkraft. Eine mikroskopische Beobachtung über die Vorgänge, wie die Lösungen oder Schmelzen dieser Stoffe von dem Papier- oder Gewebefilz oder einer mit Füllmassen versetzten oder hydraulisch abge-

bundenen faserigen Masse aufgenommen werden, zeigt in deutlicher Weise, daß die feinsten Spitzen sich sofort des Lösungsmittels bemächtigen, eine überall feuchte Oberfläche schaffen und weiter, daß der gelöste Stoff umso mehr an einem Eindringen ins Innere gehindert wird, je komplexer seine Moleküle sind. Tierische, pflanzliche und künstliche Fasern sind kolloide Gele, welche mit der Trocknung immer mehr die Fähigkeit des Quellens einbüßen. Die Lösung selbst wird deshalb noch aufgenommen, aber die Molekeln des gelösten Körpers ihrer Größe halber nicht mehr. Die feinen Kanälchen in vegetabilen Fasern besitzen einen Durchmesser in der Größenordnung von milliontel Millimetern, die Moleküle der Bindestoffe sind wesentlich umfangreicher. Oft ergibt sich das Bild, daß selbst nach einer unter Luftleere vorgenommenen Trocknung, welche das Verjagen der Lösung zum Ziel hat, die äußere Schicht durch eine feste Lackkruste gekennzeichnet ist, dann eine noch feuchte bzw. kleberige Zone folgt, darauf eine Schicht, die noch reines Lösungsmittel enthält und schließlich ein lösungs- und bindemittelfreies Inneres vorhanden ist. Daß Fasern, die mit Feuchtigkeit getränkt sind, infolge Aufgabe ihres festen Zusammenhaltes erheblich an mechanischer Reißfestigkeit einbüßen, liegt auf der Hand. Daß verdünnte Lösungen infolge verminderter Reibung besser in das Faserinnere eindringen als konzentrierte, ist ebenfalls klar. Mit ihnen erreicht man aber wiederum nicht die erwünschte Füllung der Poren.

9. Auch in bezug auf die Benetzung lassen sich durch optische Betrachtung wertvolle Wahrnehmungen machen. Man stellt Lufteinschlüsse fest, welche der eindringenden Imprägnierungsflüssigkeit in den Weg treten. Oft sind ganze Fäserchen von Luft umhüllt, welche mit einer Zähigkeit daran haftet, daß sie sogar durch mechanische Erschütterungen nicht entfernt werden kann.

Je dichter das Fasergewirr ist, um so schwieriger gestaltet sich die Durchsetzung mit der nichtleitenden Substanz. Selbst im besten und günstigsten Fall bleibt die Methode der Imprägnierung ein Behelf, denn quantitativ bringt man das Lösungsmittel, welches sich von dem darin gelösten Körper abfiltriert hat, nicht aus den Tiefen der Kanälchen heraus. Auch im Lack bleiben Spuren von Lösungsmitteln sitzen. Die äußere Lackschicht ist außerdem ein Hindernis für das Austreten der Luft und der Lösungsmitteldämpfe. Alkohol hat eine besondere Neigung, Feuchtigkeit aus der Luft aufzunehmen, welche auf diese Weise in die Poren gelangt.

Dies sind die Gründe, weshalb faserhaltige Massen einer gewissen Stärke durch Behandlung mit imprägnierenden Lösungen niemals betriebssichere elektrisch isolierende Stoffe werden. Das Imprägnierverfahren soll man daher nur bei dünnen Schichten in Anwendung bringen.

Legt man an Papier oder Gewebe, welche nur mäßig imprägniert sind und in der Faser oder im Bindemittel Luft oder Feuchtigkeit oder beides enthalten, eine Potentialdifferenz, so können wir, während oxydierende Ladungen nebenher gehen, mit dem Vergrößerungsglas

elektrolytische und elektroosmotische Vorgänge beobachten. Die Fäserchen betätigen sich dabei als Mittelleiter-Elektrode. Eine mikroskopische Untersuchung gibt über den Verlauf der Zerstörung wissenswerte Aufschlüsse, insbesondere läßt sich der Weg, welchen die Stromgänge nehmen, verfolgen.

10. Während die mit natürlichen Harzen, Kohlenwasserstoffen und dergleichen Körpern getränkten Nichtleiter nach Austreibung des Lösungsmittels fertig sind, müssen die mit trocknenden Ölen, z. B. Leinöl, oder mit Stoffen, wie chinesischem Holzöl hergestellten Isoliermaterialien längere Zeit an der Luft liegen, damit sie in der Lage sind Sauerstoff aufzunehmen. Die Bakelitekörper bedürfen noch einer anderen Behandlung, wie später gezeigt wird.

11. Ein elektrisches Isoliermaterial, dessen Fabrikation in diesem Kapitel im Abschnitt 6 gekennzeichnet ist, ist z. B. das von den Isola-Werken A.-G., Düren, aus Papierschichten und Bakelite als Bindemittel für Hochspannungszwecke hergestellte „Carta“. Es wird vorzugsweise in Röhren und Platten geliefert, aber auch in einfachen Formstücken. Die Plattengröße beträgt bis zu 1500×800 mm bei Wandstärken von 0,2—10,0 mm. Die Röhren können bis 2200 mm Länge und einem Durchmesser von 1500 mm in beliebigen Wandstärken angefertigt werden.

Die Masse läßt sich mit geschränkten und konisch geschliffenen Kreissägen bei einer Tourenzahl von 2000—2500 je Minute bequem unter Erzielung eines glatten Schnitts zerteilen und auch bis zu 3 mm starken Stücken stanzen. Das Drehen geschieht mit naturharten Stählen, welche immer gut scharf sein müssen, mit einer Geschwindigkeit von 20 m je Minute. Gebohrt wird Carta zweckmäßig unter Benutzung von Deckschichten.

Bei der mechanischen Bearbeitung ist nicht außer acht zu lassen, daß diese Art von elektrischen Nichtleitern trotz ihrer Zähigkeit und Härte aus Schichten zusammengesetzt sind. Im übrigen stellen sie auch schlechte Nichtleiter der Wärme dar.

Das spezifische Gewicht der hell- bis dunkelbraunen, teilweise auch schwarz und hochglanz polierten Fabrikate ist in Form von Platten 1,4—1,45, in Röhren 1,25—1,35.

Die Zugfestigkeit beträgt etwa 700 kg/cm^2 , die Biegefestigkeit 1200 kg/cm^2 , die Druckfestigkeit 2500 kg/cm^2 , die Brinellhärte bei Röhren 20—30, bei Platten 30—40. Der Elastizitätsmodul ist ungefähr 100000, die Schlagarbeit 12—15 cm kg/cm^2 . Die Wasseraufnahme nach den VDE-Vorschriften ist bei Platten 1,0 vH, bei Röhren 1 bis 2 vH. Die Hitzebeständigkeit geht bis zu 150°C hinauf. Die Dielektrizitätskonstante ist 4,2.

Von heißen Mineralölen und von verdünnten Säuren und Laugen wird Carta nicht angegriffen. Es ist brennbar, brennt aber entsprechend der VDE-Stufe 1 nicht weiter.

Der Oberflächenwiderstand beträgt $1000000\text{—}100000 \text{ M}\Omega$ (VDE-Vergleichszahl 4).

Bei Benutzung scheibenförmiger Messingelektroden von 70 mm Durchmesser mit abgerundeten Rändern ergeben sich folgende Durchschlagsfestigkeiten:

bei 1— 3 mm Wandstärke	20 kV/mm
„ 4— 5 „ „	15 „
„ 6— 8 „ „	12 „
„ 9— 10 „ „	10 „

Wie bei allen Isolierstoffen sinkt auch bei Carta die elektrische Festigkeit erheblich mit Zunahme der Temperatur.

Die elektrische Festigkeit hängt davon ab, in welchem Maß die Spaltprodukte des Bakelites beim Übergang in die Modifikation C aus der Masse herausgezogen werden. Mit wachsenden Wandstärken gelingt dies immer schwieriger, infolgedessen geht dann die elektrische Festigkeit zurück. Hartpapierfabrikate, welche in heißem Öl Verwendung finden sollen, sind nach der Herausnahme aus den hydraulischen Pressen nachzubehandeln.

Zur Bestimmung der elektrischen Eigenschaften wurden Cartaplatten vorerwärmt, bis sie innen und außen eine Temperatur von 110° C besaßen, und dann in Öl von 110° C 30 Minuten lang senkrecht zur Schichtebene mit Wechselstromspannung von 50 Per/s belastet. Dabei ergaben sich folgende Durchschlagswerte:

bei 1 mm Wandstärke	17,0 kV/mm
„ 3 „ „	10,0 „
„ 5 „ „	7,0 „
„ 6 „ „	5,5 „
„ 8 „ „	4,0 „
„ 10 „ „	3,0 „

Bei Beanspruchung des Materials in Richtung der Schichten soll man nicht über 1 kV/mm der Prüfspannung hinausgehen.

12. Durax, ein Hochspannungsmaterial der Isola-Werke A.-G aus Zellstoff und Bakelite, ist nicht geschichtet. Es wird in Form von Stangen, Platten und Formstücken der schwierigsten Art mit und ohne eingepreßte Metallteile geliefert. Das spezifische Gewicht beträgt 1,35. Die Biegefestigkeit ist 600 kg/cm², die Druckfestigkeit 5000 kg/cm², die Kugeldruckhärte nach Brinell 4,5, der Elastizitätsmodul auf Grund der Durchbiegung 60000, die Feuchtigkeitsaufnahme nach 24stündiger Wasserlagerung 0,001 vH. Normalstäbe von 10 × 15 mm Querschnitt erfordern zum Zertrümmern eine Schlagarbeit von 11 cmkg. Die Durchschlagsfestigkeit beläuft sich bei dicken Platten auf ungefähr 10 kV/mm, bei dünnen auf 15 kV/mm. Wärmebeständig, auch in heißem Öl, ist Durax bis zu 160° C. Die mechanische Bearbeitung durch Drehen, Hobeln, Fräsen, Bohren, Schleifen und Polieren gestaltet sich ähnlich wie bei Carta und ist daher sehr einfach. Auch lassen sich gut haltbare Gewinde einschneiden.

Die Schichtenlagerung ist also bei Durax vermieden. Auf die bei der Herstellung angewendete Richtung des Preßdrucks ist aber Rücksicht zu nehmen.

XIV. Das Verschmelzen der Faser.

Ein von der Imprägnierungsmethode grundverschiedenes Verfahren ist die Herstellung von Nichtleitern mit Hilfe fester isolierender Schmelzkörper, welche für diesen Zweck in den staubfein gemahlene Zustand übergeführt werden.

Die Kolloidchemie gibt Auskunft über die Eigenschaften solcher feingepulverten Stoffe. Sie besitzen in ihrer Wirkungsweise große Ähnlichkeit mit Flüssigkeiten, und zwar um so mehr, je feiner sie sind. Andererseits bewahren sie aber wertvolle Eigenschaften, welche sonst festen Körpern zukommen.

1. Wenn man eine faserige, ebenso wie jede beliebige andere Masse imprägniert, muß im allgemeinen zunächst der fertige Körper da sein. Die Imprägnierungslösung schon bei der Zusammensetzung und Aufbereitung der Masse zuzusetzen, verschlechtert diese oftmals nicht bloß, sondern kann den ganzen herbeizuführenden mechanischen Zusammenhalt vernichten. Chemische Kräfte wirken nur in geringer Weise aufeinander ein, wenn Harze oder Kohlenwasserstoffe in halbwegs konzentriertem Zustande die Reaktionskörper in alkoholischer oder Benzollösung umgeben. Fasern verlieren in derartigen Fällen ihren inneren Verband. Sie lösen sich voneinander, die Verfilzung wird locker, Aufquellung tritt ein.

Ganz anders verhalten sich kolloidal feingemahlene Körper. Wird derartiger, wasserabweisender, schmelzbarer Staub den Stoffen bei ihrer Zusammensetzung zugefügt, so ist er im allgemeinen zunächst nichts anderes als ein Füllmittel. Chemische Reaktionen werden ganz wenig oder überhaupt nicht dadurch beeinträchtigt, faserige Massen erleiden keine Veränderung. Der Staub benimmt sich neutral.

Die Vorbedingung für die Herbeiführung einer elektrischen Isolierung besteht, wie sich aus den früheren Darlegungen ergibt, darin, daß das nichtleitende Bindemittel überall die faserigen und sonstigen Bestandteile des herzustellenden Isolierkörpers ohne Zwischenräume zu umgeben hat. Also muß in erster Linie der Staub außerordentlich fein und gleichmäßig mit allen Bestandteilen des Körpers vermischt werden.

2. Um dies zu erreichen, ist der Grad der Mehlfeinheit des isolierenden Schmelzkörpers von großer Bedeutung. Je feiner das Pulver ist, um so größer wird die Oberfläche, welche für die Umlagerung des faserigen Gerippes und der Füllstoffe zur Verfügung steht. Man kann sich hier durch Rechnung ungefähr die Verhältnisse klarmachen.

Außerdem ist leicht ersichtlich, daß ein pulverisiertes Material um so leichter in die feinen Kanäle der kristallinisch gelagerten Zellstoffmoleküle eindringt, je mehr es in den staubförmigen Zustand übergegangen ist.

Isolierende Bindemittel können heute in der Technik durch Saugschläuche in außerordentlich feinverteiltem Zustande hergestellt werden. Ebenso besitzen wir Vorrichtungen, um Faser, Füllmittel und Staub in denkbar höchster Vollendung miteinander zu mischen.

3. Bedeutet in diesem Fall die „vollkommene Tränkung mit Staub“ die erste Bedingung für das Gelingen einer hohen elektrischen Festig-

keit, so kommt als zweite Forderung die richtige Verschmelzung der Stoffe hinzu. Wann diese durchzuführen ist, hängt von der Art der Verwendung ab, welcher die Nichtleiter dienen sollen, aber auch von der chemischen Zusammensetzung der jeweilig als Staub zugesetzten isolierenden Bindemittel. Deshalb wird oft die Verschmelzung zweckmäßig zugleich mit der Formgebung des Isolierkörpers verbunden, z. B. wenn pulverisierte härtbare Phenolharze als Schmelzkörper benutzt werden.

4. So soll z. B. eine Mischung bestehen aus Kraftzellstoff, Mineralstoff, Kohlenwasserstoffstaub, Wasser und Luft. Alle diese Stoffe befinden sich in innigster Verteilung untereinander. Sie werden über den Siebzylinder einer Papiermaschine geschickt und in feuchte Papierlagen übergeführt.

Bei der Herstellung von Hartpapier nach dem vorher angegebenen Wickel- oder Preßverfahren verfährt man, wie dies früher beschrieben ist, in der Weise, daß das Papier durch die heißen Walzen lufttrocken gemacht und dann am anderen Orte ein- oder zweiseitig mit Lack bestrichen wird. Solche Papiere enthalten also Feuchtigkeit und Luft und werden in diesem Zustand zu Nichtleitern zusammengeklebt.

Die Fabrikation von Hartpapier mit Hilfe von staubförmigen Schmelzkörpern verlangt zunächst die übliche Trocknung des mit Schmelzkörpern durchsetzten Papiers. Aber es hat noch ein anderer Prozeß von ausschlaggebender Bedeutung hinzuzukommen, nämlich die Entfernung aller Feuchtigkeit. Nicht das, was man als Trocknung zu bezeichnen pflegt, führt hier zum Ziel, sondern die Ausschaltung der dielektrisch gefährlichen Wasserreste, bevor die Temperatur auf diejenige Höhe gebracht wird, bei welcher das staubförmige Bindemittel schmilzt.

Das Absaugen der Feuchtigkeit aus dem sehr porösen Material vollzieht sich leicht bei erniedrigter Temperatur unter Luftleere. Durch Anwendung von abgestuftem mechanischen Druck, z. B. durch Heizwalzen, preßt man auch die Luft heraus.

Durch Auswahl verschiedenartiger Bindemittel lassen sich naturgemäß auch verschiedenartige Eigenschaften der Papiere und damit der hieraus hergestellten Isolierkörper erzielen. Der Bindemittelzusatz beeinflusst das dielektrische Verhalten auch durch seinen prozentualen Zusatz.

Fossile Asphalte und auch andere Kohlenwasserstoffe besitzen eine erhebliche Haftadsorption der Faser gegenüber. Je höher der Schmelzpunkt des Bindemittels ist, um so wärmebeständiger wird das isolierende Papier. Der Zellstoff soll darin in allen drei Richtungen kreuz und quer gelagert sein, damit eine große mechanische Güte erreicht wird. In einem richtig verschmolzenen Papier schaden die Fäserchen nicht mehr, weder in bezug auf die elektrische Festigkeit, noch auf ihre Neigung, Feuchtigkeit aufzunehmen. Sie sind im Bindemittel vollständig eingebettet.

Die Faser, ob sie aus Papier-, Baumwollzellulose oder sonst einem anderen organischen oder mineralischen Faserstoff besteht, soll chemisch rein sein. Mechanisch brüchige Fasern, ebenso wie solche, welche saure

Salze oder Säurereste vom Koch- oder Bleichprozeß her oder linnin-
haltige Bestandteile oder sonstige leicht zersetzbare Beimengungen
enthalten, setzen selbst in gut verschmolzenem Zustande die elektrische
Festigkeit herab.

Der Prozentsatz an Bindemitteln richtet sich nach der Verwendung.
Bei Kabelpapieren kommt man mit einem geringeren Zusatz aus als
wie bei Papier für Wickel- oder Preßzwecke oder einer Masse für Preß-
körper. Oft ist es nützlich, so viel Bindemittel anzuwenden, daß auf
der Oberfläche der Nichtleiter eine Phenolharz- oder Asphalttemaille
vorhanden ist.

5. Die Herstellung von faserigen Dielektrizis mit kolloidfein ge-
mahlten Bindemitteln ist vorher unter Anwendung der nassen Auf-
bereitung auf der Papiermaschine behandelt.

Auf die zahlreichen Methoden, welche auf dem Grundsatz fußen,
erst dann die Verschmelzung vorzunehmen, wenn sämtlichen Bestand-
teilen die Feuchtigkeit entzogen ist, soll nachstehend bei anderen
Abarten dieser Fabrikation eingegangen werden.

Wir benötigen in der Elektrotechnik große Mengen von Isolier-
materialien, welche man als Formstücke bezeichnet. Sie werden mei-
stens durch Pressungen hergestellt und erhalten dann gleich die Ab-
messungen, in denen ihre Verwendung erfolgt.

In solchen Fällen hat man es im allgemeinen nicht nötig, die Faser
erst in Papier zu verwandeln und dieses weiterzuverarbeiten, sondern
man stellt eine Mischung her, welche sofort in Matrizen gelangt und
unter Druck in die gewünschte Form übergeführt wird.

Als Faserstoffe werden hier hauptsächlich Zellulose, Sägemehl,
Baumwollabfälle und Asbest benutzt. Die Asbestfaser kann man durch
sog. Kardierung in außerordentlich feine Fäden auflösen.

Lufttrockene Faser und Bindemittelstoff, welcher sich ebenfalls in
lufttrockenem Zustande zu befinden hat, werden zusammengemischt.
Auch ein Füllmittel, welches lufttrocken ist, kann zugefügt werden.
Der Feuchtigkeitsgehalt der Ausgangsstoffe ist hier deshalb genannt,
weil eine schwere Mischbarkeit vorhanden ist, wenn sich ihr Wasser-
gehalt höher beläuft als im lufttrockenen Zustande. Für das Mischen
und die Verarbeitung nach dem vorliegenden Verfahren ist es meistens
sogar vorteilhaft, wenn Faser, Füllstoff und Bindemittelstaub schon
vor dem Zusammenmischen einzeln wasserfrei gemacht sind.

Da das mechanische Vermengen der Bestandteile so weitgehend
wie möglich erfolgen soll, weil der Erfolg der Güte in hohem Maße
hiervon abhängt, ist auf den Mischprozeß die größte Sorgfalt zu ver-
wenden. Man kann zur Prüfung und Kontrolle einen Laboratoriums-
versuch wie folgt nebenher vornehmen.

In einem Glaskolben von ungefähr 3 l Inhalt schüttet man die zu
mischenden Ausgangsstoffe, z. B. 5 vH kardierte Asbestfaser, 20 vH
fossilen Asphaltstaub mit einem Schmelzpunkt von 200° C und 75 vH
Quarzmehl. Die Teile sollen nur $\frac{1}{10}$ des Kolbenraumes einnehmen,
damit sie beim Schütteln weit auseinander fliegen und sich leicht durch-
dringen können. Von allen Mischmethoden der vorliegenden trockenem

Stoffe hat sich nach Ansicht des Verfassers diese Art, welche sich in verschiedener Weise technisch durchführen läßt, am wirksamsten erwiesen. Unter dem Vergrößerungsglas kann man den Grad der Vermengung feststellen und ist dann in der Lage, gegebenenfalls eine andere Auswahl der Komponenten zu treffen oder eine Änderung der prozentualen Zusammensetzung vorzunehmen.

Die Entziehung der letzten Feuchtigkeitsreste sowohl in den Ausgangsstoffen wie auch in der angesetzten oder fertigen Mischung nimmt man zweckmäßig bei erniedrigter Temperatur unter Luftleere vor. Je feiner die Faser ist, um so voluminöser zeigt sich die Masse. Je mehr sie während der Vakuumentfeuchtung hin und her bewegt wird, um so vollkommener gelingen die Austrocknung und der Eintritt des Bindemittelstaubes in die Poren.

Diese Behandlung hat noch den Vorteil, daß sämtliche vorhandenen flüchtigen Stoffe aus den Materialien herausgeholt werden können. Wendet man z. B. Schmelzkörper an, die Zersetzungsprodukte bilden, die verdampfbar oder gasförmig sind, so gelingt es, die schädlichen Stoffe hier zu entfernen. Auf solche Weise entzieht man den Phenolharzen abgespaltenes Wasser und flüchtige Verunreinigungen. Da die Masse unter Umständen stark stäubt, bringt man zweckmäßig vor dem Absaugrohr ein Roßhaarpolster an, welches die feinen Bestandteile zurückhält.

Ein derartig intensiv wirkendes Verfahren, um aus den Kapillaren die Wasserreste zu verdampfen und an deren Stelle den Bindemittelstaub hineinzubringen, läßt sich nach der Imprägniermethode nicht durchführen. Je wolliger die Mischungsmasse ist, um so besser gelingt die Tränkung mit pulverigen Stoffen.

Ist die völlige Entfernung des anhaftenden Wassers aus den Mischstoffen erfolgt, so kann die Verschmelzung von Faser und Füllmaterial vor sich gehen. Mitunter erlauben die Bindemittel es schon, besonders wenn sie gut wärmebeständig, aber dabei dünnflüssig im Schmelzzustand sind, daß im Anschluß an die Vakuumtrocknung gleich eine Art Verschmelzung stattfindet. Meistens ist hierbei die weitere Bewegung der zu mischenden Bestandteile von Vorteil. Die Luftleere saugt den flüssig gewordenen Bindemittelstaub in die Poren und Kanälchen hinein und stößt die letzten Spuren der Feuchtigkeit ab. Die Fasern und Fasermaterialien, welche von Staub umgeben sind, nehmen eine Art Lackierung auf der Oberfläche an. Erkalten läßt man in Luft, welche über Ätzkalk zu leiten ist, um sie wasserfrei zu machen.

Es ist ohne weiteres ersichtlich, daß bei der Durchführung derartiger Fabrikationsmethoden ein erhebliches Maß von Erfahrung und Geschicklichkeit vorhanden sein muß. So soll z. B. die Masse, wenn sie vorverschmolzen ist, nicht fest zusammenbacken, damit die Faser durch eine sonst notwendig werdende Zerkleinerung keinen Schaden leidet. Man kann auch diese Vorgänge im Laboratorium studieren, indem man den Glaskolben beim Schütteln erwärmt, den Inhalt dabei unter Luftleere setzt und absaugt. Es läßt sich dann noch mancherlei feststellen und auswerten, was sich im Betriebe leicht der Beobachtung entzieht. Sämtliche Rohstoffe, wie Faser, Füllmaterial und vor allem

die Bindemittel sind durch eine Voruntersuchung genau in ihren Eigenschaften festzulegen.

Die erkaltete, ausgetrocknete, mit Bindemittelstaub innig vermengte und gegebenenfalls vorverschmolzene Masse wird, um sie nicht mit Luftfeuchtigkeit in Berührung kommen zu lassen, so schnell wie möglich in heiße Matrizen gefüllt und mit einem heißen Stempel einem ganz schwachen Druck ausgesetzt, so daß sie ihre Wolligkeit verliert, d. h. die viele eingeschlossene Luft entweichen läßt. Hauptsache ist jetzt, dafür zu sorgen, daß keine Luft mit eingepreßt wird. Durch die Erwärmung hat die Luft an und für sich das Bestreben, hochzusteigen. Wird der Staub des Bindemittels wieder flüssig, dehnt er sich aus und nimmt den Platz der Luftbläschen ein. Durch eine fraktionierte Druckanwendung wird die Luft überall aus dem Innern ausgetrieben.

Ist die Temperatur hinreichend hoch, daß der Bindemittelstaub erweicht, übt man starken Druck durch den Preßstempel auf die Masse aus. Die Erhitzung wird dann, während der Druck in voller Höhe stehen bleibt, so weit gesteigert, daß Leichtflüssigkeit eintritt.

Die Erkaltung des fertigen Nichtleiters erfolgt am besten unter Preßdruck.

Im Laboratorium kann das dritte Fabrikationsstadium, die Pressung mit gleichzeitiger Verschmelzung und Entlüftung, gut in ihren Einzelheiten verfolgt werden. Man gibt auf die Masse, welche im Glas Kolben erstens durch den Mischvorgang und zweitens durch die Wasserentziehung aufbereitet ist, bei Entlüftung und Schmelzung des Bindemittelstaubes hydraulischen Druck und studiert die näheren Verhältnisse. Die Preßform soll aber mindestens 10 cm Durchmesser haben, damit die Reibung nicht zu groß wird und die als richtig herausgefundenen Preßdrucke auf die Verhältnisse in der Praxis zu übertragen sind.

6. Die Fabrikation elektrischer Nichtleiter bei Benutzung staubförmiger isolierender Schmelzmittel unter dem Gesichtspunkt, daß die innige Mischung von Faser und Staub nicht eher verschmolzen wird, ehe nicht da den Bestandteilen außen und innen anhaftende Wasser herausgezogen ist, hat folgende Vorteile.

Das Lösungsmittel ist vollkommen ausgeschaltet.

Die Feuchtigkeit läßt sich durch Absaugen der voluminösen Masse aus den tiefsten Stellen entfernen. Infolgedessen können dünne wie auch dicke Stücke ganz gleichförmig ohne Schichtungen hergestellt werden.

Da sich die Verschmelzung von Zellstofffaser mit Bindemitteln hoher Wärmefestigkeit vornehmen läßt, erhöhen sich in entsprechender Weise die thermischen Eigenschaften eines Zellstoffdielektrikums.

Das Mischen der Bestandteile, das Absaugen der Feuchtigkeit und das Zusammenpressen der Masse bringt keine schädliche Beanspruchung der Faser mit sich. Die mechanischen Eigenschaften werden daher nicht herabgedrückt.

Das Niederschlagen von wasserabweisenden isolierenden Überzügen auf der Faser und in den feinen Kanälen kann in Spezialfällen noch außerdem durch sekundäre chemische Reaktionen erfolgen. Die Verschmelzung hat wieder nach der Entfeuchtung stattzufinden.

Durch eine sorgfältige Entlüftung bei dem Verpressen kann die Luft aus den inneren Teilen entweichen. Lufteinschlüsse sind bei Belastung des Materials durch das elektrische Feld genau so gefährlich wie der Feuchtigkeitsgehalt. Die Entfernung von Luft sollte daher mehr Beachtung finden wie bisher. Die kritische Spannung, auch als Ionisierungspunkt bezeichnet, von wo aus der bis dahin konstante Verlustwinkel anzuwachsen beginnt, scheint um so unheilvoller zu werden, je mehr eingeschlossene Luft vorhanden ist. Aktiver Sauerstoff übt eine große Zerstörungskraft aus, sowohl auf organische als auch auf anorganische (keramische) Materialien, die sich mit Temperaturzunahme erheblich steigert. Wie die Reaktionen von Ozon- und Salpetersäure durch ein starkes elektrisches Feld gefördert werden, ist uns bisher im einzelnen unbekannt. Auf Grund der Beobachtungen sind aller Wahrscheinlichkeit nach die Zersetzungen des Nichtleiterstoffes dann am größten, wenn Luft, Feuchtigkeit und hohe Felddichte zusammenkommen.

Wird Bakelit als Bindemittel verwendet, so läßt sich der Fabrikationsprozeß, den Eigenschaften dieser künstlichen Harze entsprechend, so einrichten, daß während des Absaugens schon die Umsetzung in die Form C in geringem Maße beginnt, um die hauptsächlichsten Spaltprodukte herauszuziehen. Es ist in diesem Falle ein Vorteil der hochmolekularen Verbindungen, daß ihre Reaktionen Zeit erfordern. Die Polymerisation wird dann während des Pressens und nachher zu Ende geführt.

7. Aus allem, was im letzten Abschnitt über die Fabrikation elektrischer Isolierstoffe mit Hilfe gepulverter Schmelzkörper ausgeführt wurde, geht deutlich hervor, daß diese Methode sich nach ihrer technischen Seite hin noch erheblich vervollkommen läßt. Es scheint sich uns hier ein Weg zu eröffnen, wie man zu dem bald im großen Maßstabe benötigten Höchstspannungsisolatoren gelangen kann.

Inbesondere gibt es noch Möglichkeiten, den Einfluß der den meisten elektrischen Isolierstoffen innewohnenden Luft zu brechen. Immer mehr verdichtet sich die Ansicht, daß außer Feuchtigkeit selbst noch die geringsten Lufteinschlüsse dazu beitragen, im elektrischen Feld den chemischen Prozeß des Stromdurchgangs, also die Wanderungen von Elektronen und Ionen, einzuleiten und zu verstärken.

Aus diesem Grunde ist es für die Herstellung von Hochspannungsdielekttris zweckmäßig, die Reaktionen statt in Luft in Stickstoff, Kohlensäure und dergleichen indifferenten Gasen, auch in den sog. Edelgasen (s. S. 7) sich vollziehen zu lassen. Leitet man nach der Evakuierung der losen voluminösen entfeuchteten Mischung solche wenig reaktionsfähigen Gase ein, so daß sie die Luftspuren verdrängen helfen, verschmilzt dann und kühlt in dieser Gasschicht ab, so ist ein weiterer Schritt getan, die Wirkung der Luftverdünnung wie des Sauerstoffs und der dadurch bedingten sekundären Prozesse aufzuheben.

Bei Kabelpapier kann man z. B. so vorgehen. Das mit Asphaltstaub versetzte ungeleimte, gut aufsaugungsfähige, säurefreie Kraftpapier wird vorsichtig entfeuchtet und im indifferenten Gas abkühlen

gelassen. Die mit derartigen Papierschichten umwickelten Kabel setzt man dann im Trockenkessel bei einigen Millimetern Quecksilbersäule zunächst einer Erwärmung unter dem Schmelzpunkt des Bindemittels aus. Dann läßt man indifferentes Gas in den Kessel ein und verschmilzt die Metallteile und die Faserisolation fest miteinander. Die Abkühlung findet wieder in indifferenten Gasen statt, also in solchen, welche unter dem Druck des elektrischen Feldes weder untereinander noch mit den Bestandteilen des Dielektrikums reagieren.

In welcher Weise und mit Hilfe welcher maschinellen Vorrichtungen das Aufbringen der Papierisolation auf die Leiter von Starkstromkabeln zweckmäßig vorgenommen wird, hat Hans Müller¹⁾ zum Gegenstand einer eingehenden werkstattechnischen Untersuchung gemacht.

XV. Bindemittel und ihre Eigenschaften.

Die kapillaren Eigenschaften der Faser sind schon eingehend behandelt. Abgesehen von mineralischem Material, wie Asbest, zeigen animalische und vor allem vegetabile Fasern eine starke Neigung, sich in ihrem reinen, also nicht mit Bindemitteln verarbeiteten Zustand bei allen Temperaturen, nur natürlich dann in verschiedenem hohem Maße, zu oxydieren. Isoliertechnik ist deshalb ein Verfahren nicht zu umgehen, welches die Faser schützt. Die Faser als solche, als Faden, als Garn, als Gespinnst, als Gewebe ist derjenige Bestandteil des Nichtleiters, welcher die entstehende Masse zusammenhält.

1. Bei den Drahtumspinnungen aus Papier oder Baumwolle, welche, wie es im Transformatorenbau der Fall ist, in Öl gelagert sind, hat die Umspinnung den Zweck, sich mit Öl zu tränken und die gegebene Entfernung der metallischen Leiter von einander aufrechtzuerhalten. Öl ist das isolierende Mittel.

Aus den früheren Darlegungen wissen wir ja, daß die Umspinnung sich in ständiger Bewegung befinden muß, und zwar durch die Quellungen im Faserstoff, deren Größenwert durch die jeweilige Temperatur, das elektrische Feld, durch die Einflüsse der in die Kapillaren einwandernden Fremdkörper und durch die Ölbewegung bestimmt wird. Öl enthält stets Luft und Feuchtigkeit sowie zersetzliche Bestandteile und Suspensionen verschiedener Art beigemischt, wenn auch in frischem Zustande nur in geringen Mengen. Immerhin tragen diese Stoffteilchen dazu bei, das Umspinnungsmaterial anzugreifen. Das elektrische Feld bestimmt die Kraft und die Richtung, wie sich die Einwanderung der Ölverunreinigungen in die Drahtumgebung vollzieht. Die Anlagerungen und Durchsetzungen werden mit der Zeit immer bedeutender, der Spinnverband wird gelockert, stellenweise bringt das Potentialgefälle chemische Zersetzungen hervor, an geschwächten Punkten treten dunkle Entladungen auf, schließlich kommt es zum Stromübergang. In solchen Fällen verbürgt eine Drahtisolierung, welche dielektrisch fest am Material anliegt, bei den auftretenden Temperaturen in Öl unlöslich und

¹⁾ ETZ 1926, Heft 6 und 9.

unzersetzbar ist, also ein für den vorliegenden Zweck besonders ausgesuchtes Bindemittel besitzt, die höchste Betriebssicherheit, weil gelöste Luft- und Wasserteilchen, Suspensionen, Zersetzungsprodukte (durch oxydierende Säuren) keine Möglichkeit finden, ins Innere der Isolierung hineinzugelangen und so die Vernichtung derselben einzuleiten.

2. Die mechanische Festigkeit von Papier und Baumwolle, wenn diese Stoffe sich nicht im elektrischen Felde befinden, geht bei Temperaturen von 100° bis 120° C in Öl und flüssigem Paraffin erheblich mehr zurück, als wenn sie sich in Luft befinden. Die Faser wird zwar in Luft stärker oxydiert wie in säurefreiem Öl, aber Öle und Paraffin dringen stark trennend in die Kanälchen der Faser ein und bewirken eine Schädigung der Struktur. Bekannt ist z. B. der Vorgang, daß Öle und Paraffin in die Poren von abgebundenem Zement hineingelangen und dort Sprengungen dieses festen mineralischen Gefüges verursachen.

Die richtige Bindemittelauswahl für die elektrischen Nichtleiter ist deshalb eine äußerst schwierige Frage, weil diese Stoffe nur im geringem Maße untersucht sind und sich ihre Bestandteile auch schwer bestimmen lassen. Sie sind wenig einheitlich zusammengesetzt. Besonders komplizierte Verhältnisse treten auf, wenn diese isolierenden Massen im gelösten Zustande verwendet werden. Sie verlieren dann die Eigenschaften ihres festen Zustandes in mehr oder weniger hohem Maße, und es ist irrig, anzunehmen, daß sie nach Vertreibung des Lösungsmittels wieder ihre frühere Konstitution zurückerhalten. Außerdem ist zu berücksichtigen, was schon mehrfach ausgesprochen ist, daß die letzten Spuren der Lösung außerordentlich schwer wieder aus dem niedergeschlagenen Lack herauszubringen sind, ganz besonders, wenn diese sich tief im Innern des isolierenden Stoffes befinden. Ferner, daß durch Zersetzung entstandene Teile des Bindemittels flüchtig werden und gefährliche Bläschen absondern. Unter Hochspannung sind Stellen, die noch Lösungsmittel enthalten, sehr kritisch. Es ist zweckmäßig, sich hier wieder eine millionenfache Vergrößerung des Dielektrikums vorzustellen, um sofort die Schädlichkeit der „Nester“ als eine Veranlassung des von hier aus sich vollziehenden Stromdurchbruchs zu erkennen. Also mit Hilfe von Imprägnierungsflüssigkeiten und zersetzlichen Bindemitteln lassen sich nur dünne Papiere und Gewebe für bestimmte Spannungen hinreichend elektrisch fest herstellen.

3. Stellt man aus solchen dünnen, mit Kohlenwasserstofflösungen imprägnierten Papierlagen durch heiße Pressung Isolierstoffe her, so macht sich bei verschiedener Stärke dieser geschichteten Nichtleiter ein erheblicher Unterschied in ihren Verschiebbarkeiten (Dielektrizitätskonstanten) bemerkbar. Je mehr ihre Dicke zunimmt, um so schlechter werden die Stoffe, was durch die Schichten und die Luftpolster, welche man annehmen kann, erklärlich ist. So wurde von U. Retzow bei 1 mm Stärke eine Dielektrizitätskonstante von 2,5 festgestellt, bei 3 mm Stärke eine solche von 4,5. Dabei ist zu beachten, daß eine Steigerung des Herstellungsdrucks keine Änderung in diesen Werten hervorbringt. Auch die durch heiße Pressungen mit einem viermal so hohen Druck aus

lackierten geschichteten Papieren hergestellten Isolierplatten zeigen auf unbearbeitet gelassener Oberfläche keine Unterschiede in ihren Brinellgraden (Belastung im Verhältnis zur Eindruckoberfläche).

4. Übt man auf Nichtleiter, vor allem auf solche, welche aus faserigem Material zusammengesetzt sind, starke mechanische Zugfestigkeiten aus, so verringert sich hierdurch ihre elektrische Festigkeit. Man hat diese Erscheinung auch an keramischen Isolierkörpern festgestellt. Die mechanische Beanspruchung kann sich also auch elektrisch auswirken. Dies ist daher bei der Herstellung und der Verwendung von Nichtleitern zu berücksichtigen.

5. Dielektrische Verluste treten in festen Körpern auf, wenn diese eine inhomogene Zusammensetzung besitzen, also in allen technisch verwendeten Isolierstoffen. Wie bereits mitgeteilt wurde, zeigen flüssige Nichtleiter diese Erscheinungen nicht. Gehen daher z. B. Bindemittel durch Schmelzung oder Auflösung aus dem festen in den flüssigen Aggregatzustand über, so schwinden die dielektrischen Verluste und es ist lediglich Stromleitung vorhanden. Erstarren die Schmelzen, sind die dielektrischen Verluste wieder da, aber meistens nicht in der Größenordnung wie zuvor, weil sich die Zusammensetzung der Masse geändert hat. Beim Festwerden bilden sich in den Bindemitteln Stellen verschiedener Dichte, teilweise treten kristalline Gebilde auf. Bestandteile niedrigen Schmelzpunkts verharren längere Zeit noch flüssig, wenn solche mit höherem Erweichungspunkt schon erstarrt sind. Außerdem enthalten Schmelzen sehr oft Gase und Wasserdampf, welche dann im festgewordenen Körper Höhlungen bilden. Diese Höhlungen, auch Lunker genannt, stehen in vielen Fällen infolge der Abkühlung und Kondensation unter niedrigem Druck und stellen auf diese Weise leitende Einschlüsse dar.

Bindemittel sind nur in gelöster Form auf elektrische Isolierstoffe hin zu verarbeiten, wenn dies sich gar nicht anders ermöglichen läßt. Sonst soll man nur solche Schmelzen für die Fabrikation von Hochspannungsleitern und auch für Ausgußmassen anwenden, welche fest wie flüssig von ganz gleichmäßiger Zusammensetzung sind. Man hat also den chemischen Bau der in Frage kommenden Isolierstoffe zu untersuchen. Selbst durch sorgfältigste fraktionierte Destillation, Auskristallisieren und Abdrücken bei bestimmten Temperaturen und sonstige Abscheidungen und Ausschmelzungen ist es bis heute sehr schwierig, ein gänzlich einheitliches Bindemittel zu erhalten, weil die Trennungen meistens nicht quantitativ verlaufen und sich oftmals schwere Öle in den Destillaten finden, welche darin fein verteilt sind und in geringen Mengen schon genügen, den Erweichungspunkt des Bindemittels herabzusetzen. Oft werden höher schmelzenden Bindemitteln, z. B. Harzen, und hochmolekularen Kohlenwasserstoffen Öle zugesetzt, um sie dünnflüssig zu machen. Öle vermehren aber meistens den Schwund der isolierenden Masse und drücken die elektrische Festigkeit herunter. Wenn es erst gelungen ist, elektrisch feste künstliche Asphalte mit einem Erweichungspunkt von nicht unter 150° C herzustellen, die hinreichend dünnflüssig werden und außerdem beim Übergang in den

festen Zustand frei sind von blasigen Einschlüssen, kristallinen Bildungen und weniger festen Stellen, bedeutet dies isoliertechnisch einen großen Fortschritt.

Bindemittel von höchster Vollkommenheit nach allen wünschenswerten Richtungen hin gibt es also bisher nicht, sondern man hat von Fall zu Fall für jede Verwendungsart eine Entscheidung zu treffen. Wenn man bei guten Bindemitteln vorher eine Untersuchung auf ihre dielektrischen Eigenschaften hin vornimmt, so findet man oft, daß diese ein schlechteres Ergebnis hat, wie es die damit hergestellten technischen Isolierkörper zeigen. Dies erscheint durchaus nicht verwunderlich, sondern sogar erklärlich, weil ein aus einem Schmelzfluß entstandener Nichtleiter viel mehr Möglichkeiten besitzt, daß das elektrische Feld in seinem Innern die Moleküle zu Bewegungen von Elektronen und Ladungen zwingt als in einem mit hohem Druck durch Hitze hergestellten Preßkörper, in welchem das Bindemittel stark verdünnt vorkommt. Sind bei der Fabrikation die Fasern und Füllmittel durch das Aufbereitungsverfahren neutral gemacht, kann eine weniger günstige Eigenschaft des Bindemittels, z. B. bei höheren Temperaturen an Leitfähigkeit oder elektrischer Festigkeit einzubüßen, durch dielektrisch richtige Verschmelzung mit einer viermal so großen Masse, welche von ihr chemisch ganz verschieden ist, in erheblicher Weise an ihren eigenen Nachteilen verlieren.

6. Während Zellstoff und Baumwolle in Luft höchstens einer dauernden Temperatur von 110°C bzw. 100°C und unter Öl 105°C ausgesetzt werden dürfen, um nicht mit der Zeit zerstört zu werden, kann man diese Stoffe dadurch wesentlich wärmeester machen, wenn man sie mit Bindemitteln verarbeitet, die einen hohen Schmelzpunkt besitzen. Mit Isolierstoffen von erhöhter thermischer Beschaffenheit lassen sich Maschinen und Anlagen herstellen, welche von gesteigerter Leistungsfähigkeit sind. Deshalb geht auch das Bemühen der Isoliertechnik dahin, die nichtleitenden Baustoffe nach dieser, der thermischen Richtung hin, zu verbessern.

Sowohl in thermischer wie in elektrischer Beziehung weisen manche fossilen Asphalte Vorteile auf. Sie haben z. T. Schmelzpunkte, die weit über 200° hinausgehen und bestehen aus verhältnismäßig wenig Bestandteilen, welche frühzeitig flüssig oder flüchtig werden. Da sie oftmals stark durch anorganische Stoffe verunreinigt sind, so bedürfen sie vor der Verwendung der Ausschmelzung.

7. Belastet man Nichtleiter, z. B. Kabel, längere Zeit hindurch mit Spannungen, welche in der Nähe ihres Durchschlagswertes liegen, so stellt sich heraus, daß die elektrische Festigkeit des Isoliermaterials stark herabgeht, bis auf 20 vH und mehr. Werden solche Kabel jetzt längere Zeit stromlos liegen gelassen, und dann wieder einer Prüfung unterzogen, so stellt man jetzt fest, daß die alte Durchschlagfestigkeit wieder vorhanden ist. Man hat sich dieses Verhalten so erklärt, daß der Isolierstoff gewissermaßen durch die Überbeanspruchung stark ermüdet wurde und infolge der dann einsetzenden Ruhepause die Eigenschaft seines früheren Zustandes wieder zurückgewonnen hat.

Eine andere Erklärung solcher Zustände, die nicht nur im Kabel, sondern allgemein an den bis nahe ihrer elektrischen Festigkeitsgrenze längere Zeit hindurch belasteten Isolierstoffen auftreten, bringt diesen Vorgang mit dem Ionisationspunkt zusammen, also dem Zeitpunkt, wo der Verlustwinkel inkonstant wird und mit der elektrischen Feldstärke ansteigt.

Genau erforscht sind diese Verhältnisse nicht. Dielektrische Verluste, Ionisationspunkt, Bewegungen des Bindemittels in den Faserkapillaren, Durchschlagsfestigkeit und chemische Reaktionen im Dielektrikummaterial unter der Wirkung des elektrischen Feldes werden vermutlich in Zusammenhängen miteinander stehen. Daß Luft einen besonders hohen Anteil bei den sog. Ionisationsvorgängen hat, dürfte infolge seiner niedrigen Dielektrizitätskonstanten der Fall sein. Aber man kann sich auch vorstellen, und es ist sicher, daß außer der Luft noch sonstige Stoffbestandteile dielektrisch schwach werden, d. h. in den Ionenzustand übergehen und durch Reaktionen mit sonstigen Nichtleiterteilchen unter Wärmeentwicklung, ähnlich wie beim Ionisieren von Sauerstoff, Stromleitung herbeiführen und die Isolation vernichten.

Über die Höhe des Ionisierungspunktes, welcher zunächst ausschließlich bei der Ionisierung von Luftsauerstoff im Papierdielektrikum gedacht wird, gehen die Ansichten auseinander. Von der einen Seite wird er mit rund 2000 V/mm angegeben, von anderer Seite mit dem Mehrfachen dieses Wertes. Auch dies läßt darauf schließen, daß die Einwirkung des elektrischen Feldes auf die geschichteten Isolierstoffe noch nicht in ihren Einzelheiten bekannt ist. Die Forschungsarbeiten dürfen sich nicht nur auf festzustellende Messungen beschränken, sondern die chemische Zusammensetzung der Isolierstoffe ist zu untersuchen.

8. Auf eine eigenartige Erscheinung soll noch kurz hingewiesen werden. Bei Gasen ist sie bestimmt vorhanden, nach den Untersuchungen des Verfassers mit großer Wahrscheinlichkeit auch bei festen Körpern.

Wird ein Gas, z. B. Stickstoff, unter Druck gebracht, so steigt bekanntlich die elektrische Festigkeit proportional diesem Druck. Wenn man jetzt ein Potentialgefälle, welches der Rechnung nach noch gerade zulässig ist, sofort nach der Komprimierung anlegt, pflegt Durchschlag zu erfolgen. Legt man dieselbe Spannung aber erst nach längerer Zeit an, so wird sie gehalten. Man kann schließen, daß die wenigen freien Elektronen und Ionen, welche möglicherweise von Stoffen an den Gefäßwänden stammen, sich im zweiten Falle im Druckgas besser verteilt haben.

Bei festen Körpern lassen sich ähnliche Erscheinungen beobachten, z. B. besitzen die Preßlinge gleich nach der Herausnahme der erkalteten Matrize und auch einige Tage nachher noch nicht diejenige Durchschlagsfestigkeit, wie einige Wochen später. Die Bestandteile haben sich in dieser Ruhezeit scheinbar noch vollkommener vereinigt.

Ferner macht es den Eindruck, als ob ein mit Hilfe von Fasern hergestelltes Dielektrikum sich bessert, wenn es längere Zeit, z. B. 48 Stunden, mit einem Potentialgefälle belastet wird, welches unge-

fähr der Hälfte der Spannung entspricht, bei welcher es durchschlagen würde. Man könnte hier annehmen, daß geringe Wärme entsteht, welche auf das dielektrische Verhalten des Körpers günstige Wirkungen ausübt, zugleich mit dem Einfluß des elektrischen Feldes. Dieser eben angeführte Vorgang einer Art Selbstschutz im Betrieb ist im Hinblick auf die daraus herzuleitenden Schlüsse interessant genug, um derartige Vorgänge einer genauen Untersuchung zu unterziehen.

9. Von Bindemitteln und Ausgangsmaterialien für technische Nichtleiter ist bisher über Guttapercha und Balata, welche für die Isolierung von Tiefseekabeln sehr wertvoll sind, sowie über Gummi nichts erwähnt. Diese Stoffe besitzen besondere Bedeutung in der Industrie isolierter Leitungen. Die deutschen Normen sind unter Mitarbeit des Staatlichen Materialprüfungsamtes in Dahlem vom VDE festgelegt und aus dem Vorschriftenbuch des VDE, 13. Aufl., Julius Springer 1926, zu ersehen, sie behandeln auch die Zusammensetzung der isolierenden Hüllen. Mitte 1925 sind vom amerikanischen Bureau of Standards unter Nr. 232 eingehende Vorschriften erschienen, wie man die physikalischen und chemischen Eigenschaften des Gummis durch mechanische Prüfungen und Analysen feststellt.

Die geringe Temperaturbeständigkeit von Gummifabrikaten und ihre Oxydierbarkeit durch Lichtstrahlen haben den früher sehr umfassenden Verbrauch dieser aus pflanzlichen Säften gewonnenen Stoffe auf dem Gebiete der elektrischen Isolation erheblich beeinträchtigt. Hartgummikörper, aus Gummi unter Zusatz von Schwefel hergestellt, sind in elektrischer Beziehung ausgezeichnet und finden in der Meßinstrumententechnik noch viel Verwendung. Bei den großen unterirdischen Kabeln hat die Gummiisolierung, ebenso wie die Umspinnung mit Seide und Baumwolle in großem Umfang der vorzüglichen Papierumhüllung Platz gemacht. Guttapercha und Balata sind aber bei den Unterseetelegraphenkabeln bisher nicht durch andere Stoffe zu ersetzen.

10. Ein neues gummiartiges Bindemittel, welches aber auch ohne Zusätze verwendet werden kann, beschreibt H. W. L. Brückman in der ETZ 1925, S. 1732. Es führt den Namen Karetnja und stammt von E. S. Ali Cohen. Hergestellt wird es von der Gesellschaft für homogene Kabel im Haag. Der Hauptsache nach besteht es aus einem Asphalt, welcher mit stearinsauerm Aluminium behandelt wird. Die Masse ist elastisch und kann um Kupferadern herumgepreßt werden wie Gummi. Außer in plastischer Form läßt es sich auch in der Härte von Hartgummi herstellen. Bei 80° C tritt noch keine Formänderung auf. Feuchtigkeit gegenüber soll es sehr beständig sein. Ebenso unterliegt es nicht der Oxydation durch Luft und Lichtstrahlen. Papiere können mit Karetnja getränkt werden, die Dielektrizitätskonstante ist annähernd dieselbe wie bei geöltem Kabelpapier. Platten aus Karetnja in Stärke von 1 mm zeigen einen spezifischen Widerstand von $10^{13} \text{ } \Omega \text{ cm}^2/\text{mm}$ und eine Durchschlagsfestigkeit von 200 kV/cm. Der Verlustwinkel hat sich als höher herausgestellt wie bei ölgetränktem Kabelpapier. Es wird in Erwägung gezogen, die Kabel überhaupt nicht mehr mit Blei zu umpressen, sondern nur mit Karetnja.

Bekannt ist, daß stearinsäure Aluminium- und Magnesiumverbindungen, ebenso die mit den höheren Homologen wie Palmitinsäure erhaltenen Metallverbindungen sich als hochwärmebeständige isolierende Bindemittel ausweisen. Um das Schwindmaß herabzudrücken und eine bessere Durchdringung der Faser herbeizuführen, hat man wahrscheinlich das stearinsäure Aluminium in einem geeigneten Asphalt gelöst und ist so zu einem guten neuartigen Isolierstoff gelangt. Durch Paraffinzusatz in der Hitze lassen sich Stearate und Palmitate ebenfalls in ihren Eigenschaften modifizieren.

11. Als Bindemittel kann man auch die mit Kampferersatzstoffen behandelte azetonlösliche Azetylzellulose ansehen. In Schering, Die Isolierstoffe der Elektrotechnik¹⁾, hat der Erfinder dieser Massen, Dr. A. Eichengrün, im VII. Abschnitt über Zellonlacke als elektrotechnische Isoliermaterialien berichtet. Die azetonlösliche Azetylzellulose, auch Cellit genannt, ist eine weiße Substanz faseriger Struktur, welche bei 200°—215°C unter hohen Drucken ein fester Körper wird, welcher aber in dieser Form wenig verwendungsfähig ist. Um diese Masse elastisch zu machen, setzt man Gelatinierungs- oder Kampferersatzmittel zu und gelangt zum „Cellon“. Mit Hilfe des Cellons als Bindemittel stellt man unter Zusatz von mineralischen Füllmitteln das „Lonarit“ her, welches in der Schwachstrom-, Apparate- und Radiotechnik verwendet wird.

Kampferersatzmittel sind z. B. aromatische Sulfamide und Sulfanilide sowie Ester aromatischer Säuren und Substitutionsprodukte des Harnstoffes.

Wenn die Mischung von Cellit, der verschiedenen Kampferersatzmittel, der gepulverten mineralischen Füllstoffe und der Lösungsmittel wie Azeton, Essigester, heiße Spiritus-Benzollösung geknetet, durchgelatiniert und zum schwarzen oder anders gefärbten Pulver getrocknet, d. h. von den Lösungsmitteln befreit ist, wird die Masse gemahlen und ist preßreif. Je nach dem Verhältnis vom Bindemittel zu den anorganischen Bestandteilen hat man höhere oder niedrigere Temperaturen und Preßdrucke anzuwenden. Spritzfähige Lonaritmassen, welche wie die Preßkörper polierbar sind, setzen eine aus weniger Füllstoffen bestehende Ausgangsmasse voraus. Gemahlene Lonarit ist wieder verwendbar. Mit Azeton lassen sich Lonaritkörper zusammenkleben.

12. Auf der Jahresschau Deutscher Arbeit in Dresden im Jahre 1924, welche die Verwendung der Textilien zeigte, hatte das Telegraphentechnische Reichsamte elektrische Isolierstoffe, meistens imprägnierter Art, in umfassender Weise ausgestellt. In der Telegraphen- und Fernsprechtechnik spielen die faserigen Nichtleiter eine große Rolle, und zwar nicht nur technisch, sondern auch hinsichtlich der dafür aufzuwendenden Summen. An Stelle von Baumwolle und Seide ist in vielen Fällen jetzt Papier getreten.

Bei den hier benötigten Wechselströmen hoher Frequenz hat man neben den Leitungsströmen den Verschiebungsströmen eine besondere Aufmerksamkeit zu schenken. Ein möglichst homogenes Dielektrikum

¹⁾ Verlag von Julius Springer, Berlin.

ist erwünscht, die ungünstigen Folgen der Kapazität sind zu beseitigen. Infolgedessen besteht die Notwendigkeit, zu einer geringen Dielektrizitätskonstanten zu gelangen.

In einer großen Anzahl von Kurventafeln hatte das Telegraphentechnische Reichsamts die Beeinflussung der Isolierstoffe bei der Frequenz der Fernsprechströme gekennzeichnet. Die Theorie der dielektrischen Nachwirkung, ausgehend vom Doppelkondensator, war graphisch dargestellt, und reiches Kurvenmaterial zeigte, wie Kabelpapiere, Tränkungs-massen, fertige Drähte, Kabel und Preßstoffe sich verhalten. Vorführungen zum Aufbau der Fernkabel, Fernsprechkondensatoren, Drähte, Schnuren usw. gewährten einen Überblick über das Gebiet der mit Bindemitteln imprägnierten elektrisch isolierenden Faserstoffe.

XVI. Bakelite.

Die schon mehrfach erwähnten Phenolharze, zu welchen das Kunstharz Bakelite gehört, kann man zur Zeit als unsere wertvollsten Bindemittel für isoliertechnische Zwecke ansehen. Es gebührt ihnen daher besondere Beachtung. Die in- und ausländische Literatur, welche sich mit diesen Stoffen beschäftigt, ist von großem Umfang. Diejenigen, welche Einzelheiten interessieren, werden hierauf verwiesen.

1. Für das allgemeine Verständnis sei lediglich wiederholt, daß man durch chemische Bindung von Phenolen und Aldehyden bzw. deren Verwandten zu Stoffen gelangt, welche harzartige Eigenschaften besitzen können. Das gewöhnliche Phenol $C_6H_5 \cdot OH$, auch Benzophenol genannt, ist eine bei $43^\circ C$ schmelzende farblose kristalline Masse, das Formaldehyd $H \cdot COH$ ein stechend riechendes Gas, welches sich in Wasser löst. Die Einwirkung dieser beiden Körper aufeinander erfolgt in so verschiedener Weise, daß die dabei entstehenden Endprodukte in den mannigfaltigsten Arten ausfallen. So ergeben sich lösliche und unlösliche, amorphe und kristallinische, schmelzbare und nichtschmelzbare, poröse und einheitlich zusammengesetzte, harte und weiche, flüssige und feste Gebilde. Bei der Vereinigung wirken reines Phenol und reines Formaldehyd, meistens in äquivalenten Mengen angemacht, in der Hitze nur schwach aufeinander ein, man wendet daher sog. Kontaktmitteln, auch Katalysatoren oder Kondensationsmittel genannt. Es sind dies organische und anorganische Zusätze, welche die Reaktion einleiten, beschleunigen und meistens aus dem Molekularverband wieder austreten. Von ihnen hängt das Gelingen der Herstellung technisch brauchbarer Körper in hohem Maße ab. Auch die Temperaturen und die Mengenverhältnisse der Ausgangsstoffe bestimmen mit, was für Stoffe entstehen.

2. Um die Erforschung dieser Vorgänge hat sich der Amerikaner Dr. Leo Baekeland ein besonderes Verdienst erworben und in zäher Arbeit die äußerst schwierigen Verhältnisse entwirren helfen. Er fand u. a., daß Alkalien als Kontaksubstanz ein besonders günstiges Ergebnis herbeiführen. Die Baekelandschen Verfahren verwertet in Deutschland die Bakelite G. m. b. H., das für die Elektrotechnik wert-

volle Phenolharz kommt unter dem dieser Gesellschaft geschützten Namen Bakelite in den Handel.

Dieses Kunstharz hat folgende Eigenschaften. Es besitzt dreierlei Formen, und zwar ist es in der Modifikation A fest, flüssig und in Alkohol und anderen Lösungsmitteln löslich. Durch Erwärmung führt man es in eine Art Zwischenstufe in den Zustand B über, wo es unlöslich, aber noch plastisch ist. Bei weiterer Erwärmung ergibt sich die letzte Modifikation C, in welcher das Phenolharz hart und fest ist, sich in den üblichen Lösungsmitteln wie vor allem in Ölen, Alkohol usw. nicht mehr löst und eine hohe elektrische Durchschlagsfestigkeit besitzt. Es nimmt bei der Lagerung in Wasser keine Feuchtigkeit auf, und erweicht nicht bei höheren Temperaturen, sondern verkohlt um ungefähr 300° C herum.

Vor einiger Zeit wurde von v. d. Heyden und Typke die Frage aufgeworfen, ob Bakelite mit Spiritusdämpfen flüchtig ist. Wie sich bald herausgestellt hat und auch von den Versuchsanstellern später zugegeben wurde, ist dies nicht der Fall. Die beim Übergang von A in C in ganz geringfügigen Mengen sich abspaltenden Phenolprodukte und Wasser entweichen. Liegt ein Großbetrieb vor, so lassen sich nach Ablauf einer längeren Betriebszeit Phenolharze im Trockenofen nachweisen, welche aber nicht aus Bakelite bestehen. Das Bakelite als solches ist nicht mit Lösungsmitteln flüchtig und nicht sublimierbar.

Die Herstellung eines in seiner Masse gleichmäßig aufgebauten Kunstharzes stieß zunächst auf große Schwierigkeiten, weil sich Gase bilden, die das Gefüge schwammig machen. Diese Nachteile zu verhindern, hat Baekeland dadurch erreicht, daß er während der Reaktion, und zwar in allen drei Entwicklungsstufen je nach Notwendigkeit, die vereinte Wirkung von Wärme und Druck auf das Kondensationsprodukt oder dessen Mischung mit Füllstoffen zur Anwendung bringt und dadurch zu einem homogenen, je nach Art der verwendeten Rohstoffe weißen bis braunen, durchsichtigen oder durchscheinenden harzartigen Körper gelangt, frei von sichtbaren Hohlräumen. Dieses Verfahren, welches durch das D. R. P. 233803 noch heute geschützt ist, gehört der Bakelite G. m. b. H. Es soll hervorgehoben werden, daß durchaus nicht alle Phenolharze die wichtige Eigenschaft besitzen, durch Erwärmung hart und unlöslich zu werden, wohl aber das Bakelite. Daraus erhellt dessen hoher Wert für die elektrischen Isolierstoffe. Das Arbeiten nach dem eben angeführten Schutzrecht ist nur denjenigen gestattet, welche die Kunstharze von der Bakelite-Gesellschaft beziehen.

3. Reines Phenolharz Bakelite ist in seiner Verwendung als Bindemittel für die Herstellung elektrischer Isolierstoffe mehrfach untersucht. Auf S. 22 ist angeführt, daß eine dünne Bakeliteschicht große elektrische Festigkeit gezeigt hat. Wie wir aus den früheren Darstellungen erkannt haben, sind die Eigenschaften des Bindemittels nicht ohne weiteres auf die daraus hergestellten technischen Nichtleiter übertragbar. Erstens kann die Fabrikation an sich fehlerhaft durchgeführt sein, ferner pflegen Bindemittel oft weniger gute Eigenschaften zu be-

sitzen, welche sich in vielen Fällen bei angepaßter Verarbeitung ausgleichen lassen. Um diesen Verhältnissen Rechnung zu tragen, muß man das Verhalten des Bindemittels sowie der damit verarbeiteten Bestandteile kennen.

Elektrische Festigkeitsuntersuchungen an Bakelite werden nur dann hohe Qualitätswerte abgeben, wenn dieses Kunstharz wirklich in vollem Umfang in die Stufe C übergegangen ist. Weiterhin ist nötig, daß Gaseinschlüsse und etwaige sonstige Nebenprodukte ausgeschieden sind. Ob es möglich ist, bei dicken Kunstharzstücken diese auch in Spuren restlos auszuschneiden, ist fraglich. Es wäre deshalb angebracht, diesen wahrscheinlichen Zustand bei der Herstellung von Nichtleitern als wirklich vorhanden anzunehmen und entsprechend zu verfahren.

Zur Beurteilung eines Isoliermaterials soll man es vor allen Dingen in gebrauchsfertigem Zustand prüfen.

Bei einer Untersuchung der dielektrischen Eigenschaften von Bakeliteharz durch O. Manne¹⁾ wurde die Überführung der Modifikation A in diejenige von B und C ohne Anwendung von Druck, sondern ausschließlich durch Wärme allein vorgenommen. Es zeigt sich hier bei Steigerung der Temperatur, daß der Verlustwinkel, die Leitfähigkeit und die Dielektrizitätskonstante erheblich ansteigen, die Durchschlagsfestigkeit aber stark zurückgeht, und zwar bei 100° C um ein Viertel, bei 200° C um die Hälfte. Die Bakelisierung war so vorgenommen, daß zunächst ein spirituslösliches Bakelite A aufgetragen und lufttrocken gemacht wurde. Dann war in einem elektrisch geheizten Ofen eine Temperatur von 50—80° C angewendet, bei welcher sich die Umwandlung in C langsam und ruhig vollziehen soll, indem das Wasser, das überschüssige Phenol und Formaldehyd und der als Lösungsmittel dienende Alkohol ohne Blasenbildung entweichen. Anscheinend hat Manne die Härtung der Bakeliteschichten nicht bei ausreichend hoher Temperatur bzw. nicht lange genug vorgenommen, so daß er mit nicht völlig durchgehärteten Schichten gearbeitet hat, wodurch die starke Vergrößerung des Verlustwinkels, die Erhöhung der Leitfähigkeit und der Dielektrizitätskonstanten zu erklären ist.

Bakelite, das nur luftgetrocknet ist, zeigt eine Dielektrizitätskonstante von 16,5. Nach $\frac{1}{2}$ - bis 3stündiger Erwärmung bei 105° C beträgt sie 3,8 als niedrigstem Wert und geht nach sechsstündiger Erwärmung, welche ebenfalls bei 105° C stattfindet, bis 5,5 hinauf. Der spez. Widerstand in Ohm/cm³ ist von $7,2 \cdot 10^{11}$ auf $2 \cdot 10^{15}$ bzw. $2 \cdot 10^{15}$ gestiegen, die Durchschlagsfestigkeit einer Schicht von 0,05 mm von 1450 V auf 3100 V bzw. auf 3520 V.

Gegen die obigen Feststellungen läßt sich einwenden, daß die für den besten Qualitätsfall notwendige Anwendung von Wärme für die Bakelisierung nicht angewendet ist, und die Zeit für die vollkommene Polymerisierung zu kurz bemessen wurde. Ob ein quantitativer Übergang von A in C stattgefunden hat, bleibt daher unsicher. Leider besitzen wir bisher keine einfache Methode, um dies durch eine chemische

¹⁾ A. f. E. Bd. 12, Heft 6.
Bültemann, Dielektrisches Material.

Prüfung nachweisen zu können. Durch die Destillation dieser Kunstharze kann man wohl feststellen, ob unzulässig viel Ammoniak, Phenol oder dergleichen andere schädliche Stoffe beigemischt sind.

Ferner ist fraglich, ob die Schichten gute Verbindungen miteinander haben und ob weniger feste Stellen und Luft ausgeschlossen sind.

Da sich hier eine Anzahl ungeklärter Fragen einstellen, so fordert der Versuchsansteller deshalb selbst, weitere Messungen an Bakelite vorzunehmen. An anderer Stelle, bei H. Rochow¹⁾, findet sich neuerdings eine Messung angeführt, daß mit sinusförmigem Wechselstrom von 50 Per/s. und Elektroden von 20 mm Durchmesser und einem eingeschliffenen Krümmungsradius von 50 mm reines Bakelite bei 0,50 mm Schlagweite eine Durchbruchfeldstärke von 170 kV/cm, bei 1,5 mm Schlagweite eine solche von 60 kV/cm ergeben hat, und bei einer anderen Sorte nur Feldstärken von 15 kV/cm bei 3 mm Schlagweite. Auch hier ist keine Stellungnahme zu den Untersuchungsergebnissen möglich, da die Behandlung des Kunstharzes unbekannt ist.

In einer weiteren Arbeit neueren Datums von H. Gabler¹⁾ werden Untersuchungen an einem Bakeliteharz mitgeteilt, welches laut Angabe aus mehrmaliger Destillation gewonnen wurde. Letzteres ist nicht recht verständlich. Berichtet wird, daß wasserhaltiges Bakelite so große Streuungen hinsichtlich seiner Durchbruchfeldstärke aufweist, daß exakte Messungen unmöglich sind. Die Werte konnten nicht reproduziert werden, das Kunstharz ist unter Spannungen dauernden Änderungen unterworfen. Eine Probe, welche 40 Minuten dem elektrischen Feld ausgesetzt war, zeigt zahlreiche Sprünge und Aussprengungen, welche der Wirkung der Wärme zugeschrieben werden. Es wird dann geschlossen, daß ein geringer nicht zu beseitigender Wassergehalt sekundär eine elektrolytische Leitfähigkeit bewirkt, welche sich dem eigentlichen Durchbruchmechanismus überlagert. Wegen des unübersichtlichen und komplizierten Verhaltens wurden die Feststellungen unterbrochen.

Da auch hier nichts über die Modifikation des untersuchten Bakelites angegeben ist und ebensowenig etwas über die Vorbehandlung, kann man keine Schlüsse aus den gefundenen Zahlen ziehen. Mit hoher Wahrscheinlichkeit ist anzunehmen, daß das Phenolaldehyd nicht durchbakelisiert war, denn die Prüfungsergebnisse sind bei richtig vollzogener Polymerisation erheblich andere. Das Bindemittel Bakelite gehört in dielektrischer Beziehung zu den besten Körpern, welche wir hier haben. Wahrscheinlich wurde nicht reines Bakelite, sondern eine geschichtete Bakelitepapierprobe untersucht, die nicht völlig einwandfrei gehärtet war und vielleicht noch im Kern Reste von Spiritus enthielt.

4. Nachstehend soll beschrieben werden, wie man unter Benutzung von Bakelite verschiedene Sorten Nichtleiter herstellt. Es ist aber für denjenigen, welcher sich noch nicht damit beschäftigt hat, kaum möglich,

¹⁾ A. f. E. Bd. 14, Heft 4.

ohne Übung einfach nach diesen Vorschriften allein ein brauchbares Hochspannungsmaterial zu erhalten. Ein bestimmtes Gefühl für die sich hier abspielenden Reaktionen kommt erst mit der Erfahrung. Ferner ist nicht gesagt, daß man sich unbedingt und ganz peinlich an die angeführten Zahlenwerte halten soll, sondern es ist nur beabsichtigt, gewisse Richtlinien zu geben. So viel entspricht aber den Tatsachen, daß sich mit Bakelite bei richtiger Verarbeitung ein ganz betriebssicherer Hochspannungsnichtleiter fabrizieren läßt.

Für Formstücke, welche mit Kunstharz hergestellt werden, hat die Bakelite-Gesellschaft zur Zeit zwei verschiedene Preßmischungen in den Handel gebracht, welche außer Füllstoffen Asbest, Holzmehl, Papier u. dgl. als Faser enthalten. Sie werden in Pulverform preßfähig geliefert. Die eine Sorte ist als gewöhnliche, die andere als Schnellpreßmischung bezeichnet. Letztere braucht zur Härtung nur die halbe Zeit.

Man kann aber auch festes wie flüssiges Bakelite A beziehen und damit die Preßmischungen selbst zusammenstellen. Das feste Kunstharz pulvert man dann und löst es in hochprozentigem denaturierten Spiritus, ein Gewichtsteil Alkohol auf einen Gewichtsteil vom Kunstharz, ehe man es mit der Faser und den mineralischen Füllstoffen zu einer guten Mischung verrührt. Flüssiges Bakelite setzt man so zu, wie man es bezogen hat. Bei 90° C trocknet man die Mischung, bis die Masse sich noch gerade mit der Hand zusammenballen läßt. Oder man wartet, bis dieses durch die Selbsterwärmung in der Knetmaschine erreicht ist.

Auch für Preßmassen, welche pechhaltig sind, verwendet man Bakelite, um die mechanischen, elektrischen und thermischen Eigenschaften zu verbessern. Da diese Ansätze meistens eine längere Mischzeit von mehreren Stunden bei 120° C und noch höheren Temperaturen erfordern, darf in diesem Falle das flüssige oder das spirituslösliche Bakelite erst ungefähr $\frac{1}{2}$ Stunde vor Ende der Mischerei zugesetzt werden.

Gelöstes Bakelite mischt man auch mit Zellstoffpapieren ohne Zugabe von Füllstoffen, trocknet dann die Papiere, zerreißt sie und bringt die Masse in Matrizen, wo sie unter Druck und Hitze bis 120° C die gewünschte Form und die unlösliche und elektrisch isolierende Eigenschaft erhalten. Derartige Zellstofffabrikate kann man bis zu Erwärmungen von 150° C verwenden. Die aus Asbest-Preßmassen hergestellten Bakelitenichtleiter, welche für die Überführung des Bakelites in die Form C zweckmäßig Temperaturen von ungefähr 170° C ausgesetzt werden, sind höher hitzebeständig, und zwar bis ungefähr 300° hinauf.

Die Fabrikation der isolierenden Körper kann auf kaltem Wege erfolgen, indem man die Preßmassen in Stahlmatrizen zusammendrückt. Man bringt sie nach Herausnahme aus der Form in sog. Bakelisolatoren. Es sind dies Druckgefäße, in welchen unter einem Gasdruck von ungefähr 8 Atm. und allmählich ansteigenden Temperaturen bei 60° bis 140° C die Härtung, d. h. die Überführung von Bakelite A in die C-Form vor sich geht. Bei Anwendung längerer Zeiten kann man diesen Vorgang, welchen man auch Ausbacken nennt, auch im Trockenschrank vornehmen.

Derartige nach dem Kaltpreßverfahren angefertigte Formstücke zeigen den Nachteil, daß sie die ihnen in der Matrize verliehene Gestalt nicht genügend beibehalten und außerdem matt sind. Eine Hochglanzlackierung der gehärteten Stücke läßt sich jedoch durch Spritzen, Streichen oder Tauchen mit Bakelite-Lacken erzielen, man muß aber diesen Überzug dann noch ausbacken.

Nichtleiter besserer Eigenschaften werden in einer heißen Preßform hergestellt. Man erwärmt die Matrize auf 160—180° C und übt, indem man gleichzeitig Rücksicht auf eine Entlüftung nimmt, einen Enddruck von ungefähr 150 kg/cm² Formstempelfläche aus. Den vollen Druck läßt man dann während der Erwärmung auf die Preßmasse wirken, die Zeiten richten sich nach der Größe des Preßlings und nach dem Gehalt an Bakelite. Komplizierte Formstücke, welche ein Fließen der Preßmasse erforderlich machen, brauchen einen größeren Bakelite-Zusatz. Früher benutzte man Stauferfett, Stearinöl u. a. zum Einfetten der Stahlform. Aber hierdurch wird die Hochglanzpolitur der Matrize mit der Zeit angegriffen und dadurch der fertige Preßling unansehnlich gemacht. Deshalb säubert man neuerdings die Matrizen-teile mit komprimierter Luft.

Nach der Beheizung, welche mit Gaskränzen, elektrisch oder durch Kanäle mit 8—10 Atm. Dampfdruck erfolgen kann, wird zuweilen, besonders bei ganzen Stücken, die Matrize unter Druck etwas abgekühlt.

Die Vorschriften, mit Bakelite elektrische Nichtleiter zu fabrizieren, sollen in allen ihren Einzelheiten nicht zu weit ausgedehnt werden, weil es dabei jeweilig auf den Verwendungszweck, die Größe und die Form des Stückes ankommt. Aber es sei noch erwähnt, daß man die trockenen kalten Pulver unter sehr hohem Druck, z. B. mit 1000 kg/cm², zusammendrückt. Sie sind sehr empfindlich, lassen sich aber in Formen einführen, wo die Masse unter Hitze verpreßt wird. Es ist so eine Serienherstellung und eine Verbilligung möglich.

In einer ganzen Anzahl von Fällen hat man auch nicht nötig, mit hydraulischen Pressen zu arbeiten, sondern begnügt sich mit Kniehebelpressen, sogar mit Spindelpressen. Es ist hierbei natürlich zu bedenken, daß die Masse in alle Teile der Form unter Druck hineingepreßt werden muß, um keine porösen oder sonst mechanisch und elektrisch minderwertigen Stücke zu bekommen. Auch ist in Betracht zu ziehen, daß die Brennbarkeit von Zellstoff- und Holzmehlmischungen durch das Arbeiten mit hohem Druck herabgemindert wird. Ungefähr 2¹/₂mal so groß ist das Volumen der Preßmischung als das der fertigen gepreßten Körper. An Bakelite-Preßlingen, welche in einer heißen Form erzeugt werden, wird beim Kühlprozeß der Hochglanz erhöht.

Im allgemeinen haben die Formstücke ein bräunlich-gelbes Aussehen, man kann sie aber auch schwarz und rot färben.

Bakelite-Nichtleiter lassen sich auch durch Zusammenpressen von mit Bakelite getränkten Papierlagen, am besten aus holzstofffreien gut saugfähigem Papier und nachträgliches Ausbacken durch Pressen in Plattenform von Bruchteilen in Millimeterdicke bis zu 8 cm Dicke herstellen, ferner durch heiße Behandlung auf der Wickelmaschine in

Röhrenform, der ein längerer Aufenthalt im Bakelisorator folgt. Es entstehen hier zunächst bei dem letzteren Verfahren dünn- und dickwandige Zylinder. Häufig wird das ausgebackene Isolierstück noch in Öl bei 120—140° C gekocht. Näheres über die Art und Handhabung der Maschinen ist aus Schering, Isolierstoffe der Elektrotechnik, zu ersehen. Für die Herstellung von Durchführungen aus gewickeltem Hartpapier besteht der große Vorteil, daß die lackierten Papierlagen luftdicht um den Leiter herumgewickelt werden.

Außer Papier preßt und wickelt man Baumwolle und andere Gewebe unter Benutzung von Bakelite zusammen und gelangt dabei zu Körpern, welche eine sehr große Zähigkeit besitzen und als Zahnräder Verwendung finden.

Um die gefährlichen Schichtungen zu vermeiden, ist man neuerdings so vorgegangen, daß man nichtausgebackene gepreßte und gewickelte Bakeliterzeugnisse, wie sie vorher beschrieben wurden, zu Fasern zerkleinert, dann in üblicher Weise in Matrizen heiß preßt und darauf die Bakelisierung folgen läßt. Man erreicht auf diese Weise, daß der Preßling homogen wird. Es ist dieses Verfahren aber auch, wie sich herausgestellt hat, mit ausgebackenen Bakelitenichtleitern anzuwenden. Werden solche zerkleinert, erneut heiß gepreßt und gebacken, so ergeben sich feste isolierende Stücke¹⁾. Man hat es in der Hand, Massen von zerkleinerten, nicht ausgebackenen Bakelite-Preßlingen hinzuzufügen, desgleichen Kunstharze in reiner Form. Daß das scheinbar völlig ausgebackene hochmolekulare Bakelite nach einem mechanischen Zerkleinerungsprozeß bei wiederholter Behandlung unter Druck und Hitze von neuem abbindet, ist nicht verwunderlich. Wir haben einen analogen Fall in der anorganischen Chemie bei den hydraulisch erstarrenden Körpern. Selbst wenn Zement in langjähriger Lage erhärtet ist, gelingt die Abbindung wieder, wenn die Moleküle durch Feinmahlung zertrümmert werden. Am härtesten werden solche Körper natürlich unter Anwendung von starkem Druck.

Der Vorgang der Polymerisation von Bakelite vollzieht sich auch ohne äußere Hilfe, aber in sehr langsamer Weise. Es ist nicht ratsam, Bakelite A, vor allem nicht das flüssige und nicht in der Wärme lange Zeit lagern zu lassen.

Wie man unter Ausschluß der Lösung nur aus pulverisiertem Bakelite, Faser und Füllstoffen elektrische Nichtleiter besonderer Güte herstellt, ist auf den Seiten 66 bis 72 beschrieben. Staubfeines Bakelite wird von der Bakelite-Gesellschaft selbst hergestellt. Auch lassen sich die betreffenden Kunstharze leicht pulvern, backen nicht wieder zusammen und sind auch sehr geruchschwach. Sie enthalten kaum noch ungebundenes Phenol. Diese Bakelitesorten kommen unter der Bezeichnung S. F. mit verschiedenen Nummern in den Handel. Wieder sei hier betont, daß das Ziel in der elektrotechnischen Isoliertechnik sein muß, ein schichtenfreies und ganz gleichförmig zusammengesetztes

¹⁾ Allerdings ergibt sich die strittige Frage, ob die zerkleinerten Bakelitenichtleiter wirklich ausgebacken waren, was von den Sachverständigen teilweise verneint wird.

Material zu erhalten mit überall derselben chemischen Zusammensetzung und derselben Dielektrizitätskonstanten. Feuchtigkeit, Gase wie Luft, durch Nebenreaktionen entstandene Stoffe und sonstige Verunreinigungen sind bei der Vereinigung von Bakelite mit den dazugehörigen Materialien sorgfältig herauszubringen. Auch ganz geringfügige dielektrisch ungünstige Stellen schaden und bereiten die Zerstörung der Isolierung im Laufe einer längeren Benutzung vor. Die Kontrolle durch dielektrische Verlustmessungen ist sehr empfehlenswert und wird jetzt stark bei der Lieferung begehrt.

Witterungsbeständig sind Hartpapierdielektrika jedoch nicht. Ihre Zähigkeit, Zug-, Druck- und Stoßfestigkeiten machen sie gegenüber dem Porzellan sehr wertvoll. Der Ausdehnungskoeffizient beträgt 30 bis $40 \cdot 10^{-6}$.

Einer der großen Vorteile der mit Bakelite hergestellten Isolierkörper ist deren Unlöslichkeit in kalten und heißen Ölen. Daher finden sie in Transformatoren, Ölschaltern u. dgl. ein großes Verwendungsfeld.

Nachstehend sind in einer Tabelle die Eigenschaften von Bakelite-nichtleitern zusammengestellt.

	Hartpapiere	Preßkörper aus Bakelite-Holzmehl	Preßkörper aus Bakelite-Asbest
Druckfestigkeit	2500 kg/cm ² senkrecht zur Schicht		
Zugfestigkeit	750 kg/cm ²		
Biegefestigkeit	1200 bis 1500 kg/cm ²	700 bis 800 kg/cm ²	600 kg/cm ²
Schlagbiegefestigkeit	28–30 cm kg/cm ²	10–14 cm kg/cm ²	
Kugeldruckhärte	0,01 cm	0,05–0,01 cm	
Wasserbeständigkeit	0–1 vH	0,05–0,1 vH innerhalb 48 Std.	
Wärmebeständigkeit	bis 200° C vorübergehend 300°	150° C	180° C
Verhalten in heißem Öl	beständig	beständig	beständig
Säurebeständigkeit	beständig auch gegen Salzlösungen	beständig	beständig
Spez. Gewicht	1,3–1,4	1,2	1,8–2
Durchschlagsfestigkeit	15–30 kV/mm senkrechter Schicht. Starke Wandungen weniger	14 bis 18 kV/mm	9 kV/mm
Oberflächenwiderstand	40–50 000 MΩ	1 Mill. MΩ	50 000 MΩ
Dielektrizitätskonstante	3,5–5	4,5–5,5	2,5–3,0

XVII. Isolierende Öle.

Transformatorwindungen, Hochspannungsschalter und verschiedene sonstige Hochspannungseinrichtungen haben die unangenehme Eigenschaft, daß sie in vielen Fällen in elektrisch isolierenden Ölen gelagert sind. Wir benötigen also für eine Energieform, die unter Umständen feuergefährlich werden kann, ein Isoliermaterial, welches explosive Zersetzungsprodukte in sich birgt. Trotzdem wird in der Hochspannungstechnik die Bedeutung des Öles als Dielektrikum immer größer. Ungeheure Mengen Öl werden für diese Zwecke benötigt.

1. Von den Ölsorten, welche es gibt, kommen hier nur die Harz- und Mineralöle, vor allem die zuletzt genannten, in Betracht. Harzöle entstehen aus pflanzlichen Rohstoffen, z. B. bei der Destillation von Kolophonium. Sie zeichnen sich durch große Reinheit aus und sind im Transformatorenbetrieb durchaus geeignet. In Schaltern verhalten sie sich deshalb ungünstig, weil sie im Lichtbogen stark kohlen. Bei ihrer Verwendung spielen auch wirtschaftliche Gründe sehr mit.

In den meisten Fällen werden Mineralöle benutzt. Sie sind in ihrer chemischen Zusammensetzung von großer Verschiedenheit, uns fehlt trotz einer Unmenge von Forschungsarbeiten noch ein genauer Einblick in die Bestandteile. Auf kritische Untersuchungen ihrer Konstitution soll an dieser Stelle nicht eingegangen werden. Über die Ölbildung in der Erde gibt es zwei Anschauungen, die Entstehung aus anorganischen Ausgangsstoffen mit dem Weg über die Karbide, und die jetzt am meisten anerkannte Vorstellung des Entstehens aus vegetabilen und animalischen Resten. Wie durch Destillieren und Filtrieren der Naturfunde Transformatoren- und Schalteröl gewonnen wird, ist aus den Darstellungen von Fr. Frank in Schering, Isolierstoffe der Elektrotechnik, zu ersehen.

2. Bei der Beurteilung der Einwirkung des elektrischen Feldes auf Mineralöle hat man von der Vorstellung auszugehen, daß im Öl trotz einer Verarbeitung, welche auf elektrische Festigkeit hinzielt, dielektrisch wesensverschiedene Stoffe enthalten geblieben sind, welche aufeinander reagieren. Es ist uns durch das Experiment bekanntgeworden, daß die kleinsten Unterschiede im Verhältnis von Leitfähigkeit zur Dielektrizitätskonstanten mit der Zeit größere Schäden verursachen können. Eine homogene Lösung ist Öl nicht. Es sind darin Stoffe uns noch unbekannter Zusammensetzung enthalten, welche sich teils ineinander lösen, teils anlagern. Durch Polymerisationen, Kondensationen und Oxydationen ändert sich der Zustand des Öls. Nicht zu vergessen ist, daß es im elektrischen Betrieb heiß wird, und die Wärme nach den Vorschriften des VDE bis auf 95° C steigen kann. Es entspricht auch nicht den Tatsachen, daß niedrig siedende Bestandteile quantitativ durch die Vorbehandlung aus dem Öl herausgetrieben werden. Durch den Sauerstoff der Luft sind die Öle allmählichen und dauernden Veränderungen ausgesetzt. Außerdem betätigen sich die Metalle, vor allem Zink, Eisen und Kupfer, als Reaktionen hervorrufende und beschleunigende Katalysatoren. Da bei der Erwärmung im Betrieb

ungleichmäßig heiße Schichten entstehen, so ist dies auch ein Umstand, welcher der elektrischen Festigkeit schadet. Messungen der Dielektrizitätskonstanten und der Leitfähigkeiten warm gewordener Transformatorenöle zeigen, daß schon bei den im Betrieb auftretenden und zulässigen Temperaturen ein sehr starkes Anwachsen der Verschiebbarkeit und ein beträchtliches Nachlassen der Leitfähigkeit stattfinden, was als Zeichen eines anisotropen Zustandes zu deuten ist. Die Konzentrationsänderungen haben Elektronen- und Ionenbildung zur Folge und veranlassen daher Stromwanderung. Durch die Umspinnung der Drähte treten feine Fäserchen in das Öl ein, welche sehr schaden, da sie elektrostatisch beeinflußt werden und Brücken bilden. Auch sonstige Verunreinigungen übler Art durch anorganische und organische Teilchen pflegen sich einzustellen.

Die größte Gefahr für die elektrische Festigkeit wird aber wieder, wie wir es von anderen Nichtleitern her schon kennen, auch beim Öl durch Luft und Feuchtigkeit hervorgerufen. Zeigt Öl schon in neutralem Zustande oxydierende Eigenschaften, indem es z. B. auf Baumwolle bei Anwesenheit von Luft derart reagiert, daß eine Selbstentzündung eintritt, so werden diese Affinitäten im elektrischen Felde aller Wahrscheinlichkeit nach noch verstärkt. Sauerstoff- und Hydroxylionen gehen Bindungen mit den Ölbestandteilen ein, welche teils löslich, teils unlöslich sind, sich am Boden des Ölgefäßes absetzen, aber auch in den Drahtwickelungen. Ein verschmutzter Transformator ist natürlich nicht in der Lage, den gewünschten Wärmeausgleich herbeizuführen. Die Verunreinigungen sind die Veranlassung, daß hohe Felddichten zustande kommen.

Gehen die genannten Vorgänge wegen der zur Verfügung stehenden geringen Mengen auch nur anfangs im kleinen Maße vor sich, so häufen sich doch mit der Zeit die Schäden und führen Zerstörungen herbei.

Den Explosionen, welche seltener in Transformatoren, häufiger in Ölaltern durch Entzündung von Kohlenoxyd, Wasserstoff und gasförmiger Kohlenwasserstoffe aufgetreten sind, kann man durch konstruktive Maßnahmen begegnen. Die Schalter dürfen nicht zu klein bemessen sein. Der VDE hat hierfür die Richtlinien gegeben. Wenn in manchen Fällen kein Grund für eine Entzündung der Gase durch den Lichtbogen oder heiße Metallteile zu finden war, liegt noch die Möglichkeit vor, hierfür das Vorhandensein galvanischer Ströme verantwortlich zu machen. Schon eine 3proz. Mischung brennbarer Gase ist gefährlich. Schalteröle haben eine andere Aufgabe als Transformatorenöle, sie sind hauptsächlich dazu da, den Funken auszulöschen. Sie können deshalb außer durch Kohlenstoff durch zerstäubtes Metall verunreinigt werden. Man kann Ölgase als leitend ansehen.

Noch wenig aufgeklärt sind die elektrischen und chemischen Vorgänge bei der Herstellung von Voltolölen. Es können außer pflanzlichen und tierischen auch mineralische, vor allem die billigeren Sorten dieser Öle, benutzt werden. In geschlossenen liegenden zylindrischen Kesseln unter einem Gasdruck von ungefähr 60 cm Quecksilbersäule, also in einem luftverdünnten Raum, wird das Öl elektrischen Glimm-

entladungen ausgesetzt, welche mit Einphasen-Wechselstrom von 4300—4600 V Spannung und 500 Per/sek erzeugt werden. Als Elektroden dienen Aluminiumbleche von ungefähr 80 cm im Quadrat bei 0,1 mm Stärke, welche durch Preßspan voneinander isoliert sind. Die Einrichtung für die Behandlung des Öls mit Glimmlicht ist um die horizontale Achse des Kessels drehbar eingerichtet. Der Prozeß verläuft bei einer Temperatur von 80—100° C.

Während früher durch die Glimmentladung eine Anlagerung und Anreicherung von Wasserstoff an die Kohlenwasserstoffe des Öles, also eine Polymerisation, angenommen wurde, denkt man sich jetzt die Bildung des hochviskosen Voltolöles dadurch entstanden, daß sich unter Wärme Bindungen ergeben und eine elektrolytische Umwandlung der Ölmoleküle eintritt. Die Glimmentladungen verleihen den Molekülen hohe Geschwindigkeiten und zerlegen sie in Atome. Wasserstoff wandert ab, und die gespaltenen Molekülreste lagern sich zu größeren Verbänden zusammen, so daß der Flüssigkeitsgrad steigt. Die hohe Viskosität, welche bis zu 170 Englergraden bei 100° C hinaufgeht, hat diese durch die Behandlung mit elektrischen Glimmentladungen entstandenen Voltolöle in erster Linie als Schmiermittel wertvoll gemacht.

Bei Anwendung hoher elektrischer Potentialdifferenzen auf Transformatoren- und Schalteröle zeigt sich, daß ähnlich wie in Luft die Zerstörung des Öles zuerst durch Glimmen sichtbar wird, einem Vorgang, dem aber stille Entladungen längst vorhergehen und deshalb auch langsam verlaufende Zerstörungen des Isolierstoffes. Da sich unter den verschiedenartigen Bestandteilen des Öls zahlreiche Gruppen befinden, welche mit Vorliebe Sauerstoff aufnehmen, setzt die Bildung von hochmolekularen organischen Säuren, harzartigen Stoffen und anderen löslichen und unlöslichen Körpern ein, die auch sekundär wieder aufeinander reagieren. Wasser kann sich hierbei auch bilden. In welchen Mengen diese Reaktionsprodukte zustande kommen, ist von dem Grade der Raffinierung abhängig, ferner von der Größe der Feldichte und außerdem von der Wirkung des Katalysators. Stets ist bei solchen Erwägungen zu beachten, daß man dieselben Ölsorten bei Nachbestellungen schwer in genau gleicher Zusammensetzung wieder erhält, ein Gesichtspunkt, welcher für den praktischen Gebrauch sehr wesentlich ist.

Früher wurde angenommen, daß der Sauerstoff zunächst eine Polymerisation von Ölbestandteilen herbeiführt, und erst dann durch weitere Sauerstoffaufnahme dieser polymerisierten Körper ein Zerfall in die niedriger molekularen organischen Säuren stattfindet. Nach den Untersuchungen von H. Stäger im B.B.C.-Laboratorium ist dies jedoch nicht der Fall, sondern an Naphthen- und Methanölen wurde festgestellt, daß sich die Säuren zuerst bilden und erst daraus nach einiger Zeit die Schlamm- bildung einsetzt. Diese Reaktionen gehen außerdem nicht kontinuierlich vor sich, sondern in Stufen. Es setzt die Säurebildung zeitweilig aus.

Die Neigung des Öles, unter dem Einfluß des elektrischen Feldes und ferner der katalytisch wirkenden Metalle und vielleicht auch noch

anderer Stoffe mit dem gelösten, dem aus der Luft stammenden und dem sekundär abgeschiedenen Sauerstoff sowie der Feuchtigkeit, besonders bei erhöhten Temperaturen, Zersetzungsprodukte zu bilden, welche teils gelöst bleiben, teils sich in den Wickelungen festsetzen, teils als Schlamm den Boden der Gefäße bedecken, schafft hier Zustände, welche unübersichtlich sind und sich im einzelnen schwierig verfolgen lassen. Für isolierende Öle ist es aber notwendig, ihre Oxydierbarkeit zu kennen. Man stellt deshalb bei ihnen die sog. „Teerzahl“ und die „Verteerungszahl“ fest.

Die erstere wurde von Kissling vorgeschlagen. Man ermittelte sie in der Weise, daß Öl mit einer 4 vH Ätznatronlösung, halb Wasser und halb Alkohol, 20 min auf dem Wasserbade gekocht, die Lauge ausgeschüttelt und der eingewanderte Bestandteil festgestellt wird. Die „Verteerungszahl“ soll einen Anhalt dafür geben, wie sich neues Öl im Transformator verhält.

Ferner kommt es bei den Transformatorölen auf ihren Flüssigkeitsgrad an, weil das Öl noch die wichtige Aufgabe hat, die entstandene Stromwärme abzuleiten. Auch die Kenntnis, bei welcher Temperatur sich aus dem Öl brennbare Gase entwickeln und in welchen Mengenverhältnissen diese stehen, ist notwendig. Ferner ist der Stockpunkt zu bestimmen, d. h. wann das Öl bei Kälte in den festen Zustand überzugehen beginnt und plastische Eigenschaften annimmt. Mineralöle sollen frei sein von Mineralsäuren. Organische Säuren und Aschegehalt dürfen nur geringe Werte aufweisen.

Dann ist zu unterscheiden zwischen einem Öl, welches von der Raffinerie im Kesselwagen und in eisernen Fässern, nicht in Holzfässern, angeliefert wird, und einem Öl, welches frisch im Transformator oder im Ölschalter Verwendung findet, und ferner einem Öl, das sich in diesen Anlagen in Gebrauch befunden hat.

Da sich auf keine Weise vermeiden läßt, daß der Transport von der Lieferantin aus durch die Wände der eisernen Gebinde und durch Schütteln und durch nähere Berührung mit der umgebenden Luft ohne Feuchtigkeitsaufnahme abgeht, soll das Öl vor der Einfüllung in die elektrischen Apparate von Unreinigkeiten, vor allem von Feuchtigkeit, befreit werden.

3. Der VDE hat auf Vorschlag der Kommission für Isolierstoffe Vorschriften für Transformatoren- und Schalteröle herausgegeben, welche hauptsächlich von G. Stern bearbeitet wurden. Sie sind in der ETZ 1924, S. 346 veröffentlicht und von der Jahresversammlung 1924 unter Gültigkeit vom 1. Oktober 1924 ab genehmigt. Nachstehend werden die Richtlinien wiedergegeben und anschließend daran die Methoden der Prüfungen.

Vorschriften für Transformatoren- und Schalteröle¹⁾.

§ 1. Die Vorschriften treten am 1. Oktober 1924 in Kraft.

§ 2. Die Vorschriften der § 3—7 beziehen sich sowohl auf neues als auf im Apparat angeliefertes Öl. Die Vorschriften der § 8—10 beziehen sich

¹⁾ Angenommen durch die Jahresversammlung 1924. Veröffentlicht: ETZ 1923, S. 600 u. 1098; 1924, S. 346 u. 1068.

lediglich auf neues Öl, die Vorschrift des § 11 bezieht sich auf ein dem im Betriebe befindlichen Transformator oder Apparat entnommenes Öl.

§ 3. Als Mineralöle sollen für Transformatoren und Schalter nur Raffinate verwendet werden. Auf Schiefer- und Braunkohlenteeröle beziehen sich diese Vorschriften nicht.

§ 4. Das spezifische Gewicht darf nicht weniger als 0,85 und nicht mehr als 0,95 bei 20° C betragen.

§ 5. Der Flüssigkeitsgrad (Viskosität) bezogen auf Wasser von 20° darf bei einer Temperatur von 20° C nicht über 8° Engler sein.

§ 6. Der Flammpunkt, nach Marcusson im offenen Tiegel bestimmt, darf nicht unter 145° C liegen.

§ 7. Der Stockpunkt des Schalteröles muß mindestens -15° C betragen, der Stockpunkt des Transformatorenöles braucht nicht tiefer als bei -5° C zu liegen.

§ 8. Das neue Öl muß bei 20° C vollkommen klar sein; es muß frei sein von Mineralsäure. Der Gehalt an organischer Säure darf höchstens 0,2 (berechnet als Säurezahl) betragen. Der Gehalt an Asche darf 0,01 vH nicht übersteigen.

§ 9. Das neue Öl muß praktisch frei von mechanischen Beimengungen sein.

§ 10. Die Verteerungszahl des neuen ungekochten Öles darf 0,2 vH nicht überschreiten.

§ 11. Die dielektrische Festigkeit des dem im Betriebe befindlichen Transformator oder Apparat entnommenen Öles soll, gemessen nach den Prüfvorschriften, im Mittel 60 kV/cm nicht unterschreiten. Ist die dielektrische Festigkeit geringer, so muß das Öl gereinigt bzw. erneuert werden. Ergibt das Erhitzen des Öles im Reagenzglas auf rund 150° C das Vorhandensein von Wasser durch knackendes Geräusch, so erübrigt sich die Untersuchung der dielektrischen Festigkeit und das Öl muß getrocknet werden.

Unter neuem Öl (§ 8, 9, 10) ist ein Öl zu verstehen, wie es in Kesselwagen oder Eisenfässern von der Raffinerie angeliefert wird. Die Anlieferung darf nicht in Holzfässern erfolgen.

Die Untersuchung, ob die Öle diesen Vorschriften entsprechen, hat nach den nachstehenden Prüfvorschriften zu erfolgen:

Prüfvorschriften.

Aus den Kesselwagen oder Eisenfässern sollen Proben nach den folgenden Vorschriften entnommen werden:

a) Für Kesselwagen: Ein Glasrohr von 1½—2 m Länge (etwa 15 mm l.W.), das auf der einen Seite rund abgeschmolzen ist, so daß man es gut mit dem Daumen verschließen kann, und auf der anderen Seite ein wenig stumpf angezogen ist, wird in geöffnetem Zustande langsam durch den Dom des Wagens bis zum Boden des Kesselwagens eingeschoben, so daß beim Durchschieben aus allen Teilen des Wageninhaltes Teile in das Rohr eintreten. Wenn das Rohr den Boden berührt, wird es mit dem Daumen verschlossen und aus dem Wagen herausgehoben. Der Inhalt des Rohres und das etwa außen anhaftende Öl wird in ein Gefäß gebracht. In gleicher Weise wird die Probeentnahme so oft wiederholt, bis mindestens eine Probemenge von 2 l vorhanden ist. Es wird nochmals gut umgerührt und die so entnommene Probe in zwei Teile geteilt, von denen der eine für eine Kontrollprüfung für den Fall der bei der Werkuntersuchung gefundenen Abweichung zurückgestellt wird. Wird die Probe als einwandfrei erachtet, so kann eine Gegenprobe höchstens für die Sammlung von Vergleichsmaterialien bzw. Beanstandungen, genau bezeichnet und einwandfrei verschlossen, zurückgehalten werden. Eine Verpflichtung hierzu besteht aber bei erfolgter Abnahme nicht.

b) Für Eisenfässer: Ein Glasrohr, gleicher Ausführung wie zu a) beschrieben, aber entsprechend kürzer, wird durch das geöffnete Spundloch eines jeden fünften Fasses eingeführt. Aus jedem dieser Fässer wird eine

Probe entnommen oder doch jedenfalls soviel, daß aus der gesamten Sendung wieder eine Probemenge von rund 2 l gebildet werden kann. Auch hier wird wieder gut durchgemischt und im übrigen wie oben verfahren.

Über die Probenentnahme aus dem im Betriebe befindlichen Transformator oder Apparat siehe die Erläuterung zu § 11.

Erläuterungen.

Zu § 4. Die Ausführung der Bestimmungen des spezifischen Gewichtes kann nach einer beliebigen Arbeitsweise vorgenommen werden. Für die Umrechnung auf 20° ist der Ausdehnungskoeffizient von 0,007 zu benutzen (z. B. gefundenes spezifisches Gewicht

bei 15° =	0,8700
Korrektur = $5 \times 0,0007 =$	-0,0035
Spezifisches Gewicht bei 20°	0,8665).

Zu § 5. Zur Viskositätsbestimmung wird der Apparat von Engler benutzt (siehe Holde, „Untersuchung der Kohlenwasserstoffe, Öle und Fette“, 4. Aufl., S. 139, 5. Aufl., S. 23).

Zu § 6. Zur Flammpunktbestimmung ist der im „Holde“ 4. Aufl., Abb. 74 u. 75 (5. Aufl., Abb. 35) abgebildete Apparat mit wagerechter Flammenführung zu benutzen (Versuchsausführung vgl. 4. Aufl., S. 178, bzw. 5. Aufl., S. 61/62). Hierzu sind die vorschriftsmäßigen, von der PTR geeichten Flammpunktthermometer zu verwenden, bei deren Eichung die Korrektur für den herausragenden Faden bereits berücksichtigt ist.

Zu § 7. Das Verhalten des Öles in der Kälte muß derart sein, daß es nach einstündigem Abkühlen auf -15°C bzw. -5°C noch fließt. Die Prüfung geschieht nach dem folgenden Verfahren:

Das Öl wird in ein 15 mm weites Reagenzglas 3 cm hoch mit der Pipette eingefüllt, und zwar so, daß die Glaswand oberhalb des Ölspiegels nicht benetzt wird. Das Reagenzglas wird mittels eines Gestelles oder Halters senkrecht in das Kühlgefäß eingestellt und eine Stunde lang bei -15°C abgekühlt. Die Abkühlung erfolgt in einer Salzlösung, die durch Auflösung von 25 Teilen Salmiak in 100 Teilen Wasser zu bereiten ist. Die Abkühlung dieses Bades wird durch Einstellung der Lösung in eine Mischung von Eis und Viehsalz bewirkt. Nach Ablauf einer Stunde wird das Reagenzglas, ohne es herauszunehmen, in eine schräge Lage gebracht und die Veränderung des Flüssigkeitsspiegels beobachtet. Der flüssige Zustand des Öles zeigt sich nach dem Herausnehmen des Reagenzglases daran, daß die Glaswandung vom Öl einseitig benetzt ist.

Zu § 8.

a) Reinheit des Öles. Zur Feststellung, ob das Öl klar ist, wird eine frisch aus dem Versandbinde entnommene Probe in einem Reagenzglase von 15 mm l. W. 1 h lang bei 20° C der Ruhe überlassen. Ist die Probe nach dieser Zeit klar, so entspricht sie den Anforderungen. Eine Trübung kann auch von zu hohem Wassergehalt herrühren, der sich durch Kochen beseitigen läßt.

Zum Nachweis von freier Mineralsäure werden (nach Holde) 100 cm³ mit 200 cm³ heißem destillierten Wasser im Scheidetrichter oder Kolben kräftig durchgeschüttelt, bis sich das Öl genügend im Wasser verteilt hat. Nach dem Absetzen filtriert man die wässrige Schicht durch ein angefeuchtetes Faltenfilter und versetzt das Filtrat mit einigen Tropfen Methyl-Orange, wobei keine Rotfärbung eintreten darf.

b) Säurezahl. 10 g Öl werden in einen 200 cm³ fassenden Erlenmeyer-Kolben eingewogen und in 75 cm³ eines vorher neutralisierten Gemisches von zwei Teilen Benzol und einem Teil Alkohol aufgelöst. Hierbei wird nach Versetzen mit einigen Tropfen Phenolphthaleinlösung (bei dunkelgefärbten Ölen kann Alkaliblauf 6 B [2 cm³] zugesetzt werden) aus einer Bürette eine genau eingestellte, $\frac{1}{10}$ normal alkoholische Kalilauge bis zur deutlichen Rotfärbung (bei Benutzung von Alkaliblauf bis zum Farb-

umschlag) zugegeben. Die Säurezahl ist der Verbrauch an mg KOH für 1 g angewandtes Öl. Wurden bis zum Farbumschlag beispielsweise $\frac{3}{10}$ cm³ KOH verbraucht, so errechnet sich die Säurezahl wie folgt:

$$\frac{0,3 \times 5,6}{10} = 0,168 \text{ mg KOH } \left. \vphantom{\frac{0,3 \times 5,6}{10}} \right\} \begin{array}{l} (5,6 \text{ ist die Anzahl gKOH/Liter in} \\ \frac{1}{10} \text{ normaler Kalilauge).} \end{array}$$

Die Säurezahl ist dann 0,168.

c) Aschegehalt. Etwa 20 g, besser etwa 100 g Öl werden in einem Tiegel aus Platin, Porzellan oder Quarz auf der Wage eingewogen (Schale ist vorher auszuglühen und für sich auf der analytischen Wage zu wiegen) und über freier Flamme langsam bis zum Brennpunkt erhitzt. Sobald sich die Öldämpfe entzündet haben, muß man mit dem Erhitzen vorsichtig fortfahren, um Verspritzungen zu vermeiden. Nachdem das Öl abgebrannt ist, wird der entstandene Ruß vorsichtig abgeglüht. Sollte sich schwer verbrennlicher Koks gebildet haben, so ist die Asche mit heißem Wasser auszuwaschen und durch ein quantitatives Filter zu filtrieren. Das Filtrat wird in dem vorher benutzten Tiegel, nachdem die Kohle und das Filter in diesem verbrannt sind, zur Trockne eingedampft. Der gesamte Rückstand wird dann vorsichtig bis zur beginnenden Rotglut erhitzt und nach dem Erkalten gewogen.

Zu § 9. Mit dem Ausdruck „praktisch frei“ ist gemeint, daß keine mikroskopisch sichtbaren Beimengungen vorhanden sein dürfen.

Zu § 10. Verteerungszahl. Es wird darauf hingewiesen, daß die Bestimmung der Verteerungszahl besonders schwierig ist und im Zweifelsfalle von einem Spezialchemiker ausgeführt werden muß.

a) Allgemeine Methode, die bei Transformatoren- und Schalterölen im Zweifelsfalle als Schiedsmethode gilt (70 h 120° O₂). 150 g des frischen ungebrauchten, filtrierten Öles werden in einem 300 cm³ fassenden Erlenmeyer-Kolben (Schott & Gen., Jena) in einem Ölbad 70 h ununterbrochen unter gleichzeitigem Durchleiten von Sauerstoff auf 120° C erwärmt. Der Sauerstoff passiert 2 Waschflaschen, von denen die erste mit Kalilauge (spez. Gewicht 1,32), die zweite mit konz. Schwefelsäure (spez. Gewicht 1,84) beschickt ist (die Waschflaschen sollen ein Fassungsvermögen von mindestens $\frac{1}{4}$ l bei hoher zylindrischer Form haben und etwa auf $\frac{1}{6}$ ihrer Höhe mit der Waschflüssigkeit beschickt sein). Die Erwärmung wird in einem zuverlässig regelbar geheizten Ölbad ausgeführt. Die vorgeschriebene Temperatur ist in dem zu untersuchenden Öl zu überwachen. Das Ölbad ist mit einem Rührwerk auszustatten. Der Kolben ist durch einen Korkstopfen mit seitlicher Einkerbung verschlossen, durch den das 1–2 mm über dem Boden des Kolbens mündende Einleitungsrohr führt (die l. W. des Einleitungsrohres soll genau 3 mm, die Anzahl der Blasen je s 2 betragen).

Nach der geschilderten 70stündigen Vorbehandlung werden 50 g des gut durchgerührten Öles in einem mit Rückflußkühler versehenen, 300 cm³ fassenden Erlenmeyer nach Zusatz einiger Siedesteine 20 min lang auf siedendem Wasserbade mit 50 cm³ eine Lösung erwärmt, die durch Auflösen von 75 g möglichst reinem Ätznatron in 1 l dest. Wasser und durch Hinzufügen von 1 l 96 vH Alkohols zu bereiten ist. Ohne den Rückflußkühler zu entfernen, wird hiernach das warme Gemisch 5 min lang kräftig geschüttelt, wobei der Kolben zweckmäßig mit einem Tuch umwickelt wird. Sein Inhalt wird nach dem Erkalten in einen Scheidetrichter übergeführt und nach eingetretener Schichtung ein möglichst großer Anteil der alkoholisch-wässrigen Lauge durch ein gewöhnliches Filter in einen Kolben filtriert. Von dem Filtrat werden 40 cm³ abpipettiert, in einem zweiten Scheidetrichter mit einigen Tropfen Methyl-Orange versetzt und mit Salzsäure bis zur deutlichen Rotfärbung der Flüssigkeit angesäuert (hierzu sind etwa 6 cm³ Salzsäure vom spez. Gewicht 1,124 erforderlich). Die durch das Ansäuern abgeschiedenen Teerstoffe werden in 50 cm³ reinem Benzol vom Siedepunkt 80/82° C (das beim Eindampfen auf dem Wasserbade keine

Spur eines Rückstandes hinterlassen darf) aufgenommen. Das Ausschütteln ist mit 50 cm³ Benzol in einem dritten Scheidetrichter noch einmal zu wiederholen.

Nach dem Ablassen der wässerigen Schicht wird der erste Benzol-auszug im Scheidetrichter Nr. 3 mit dem zweiten Benzolaustrag vereinigt, wobei der Scheidetrichter Nr. 2 mit etwas Benzol nachzuspülen ist. Der Benzolaustrag wird dann im Scheidetrichter Nr. 3 zweimal mit je 50 cm³ dest. Wasser sorgfältig ausgeschüttelt. Starkes Schütteln ist zu vermeiden, da sonst Emulsionsbildung eintritt.

Nach dem Ablassen der letzten sichtbaren Wasserreste wird die im Scheidetrichter zurückbleibende Benzollösung in einen Weithals-Stehkolben von 250 cm³ Inhalt (Schott & Gen., Jena) übergeführt, der zuvor mit einigen Siedesteinen gemeinsam auf der analytischen Wage gewogen wurde. Dieser Kolben wird mit einem tadellosen, gut ausgepreßten und von jeglichem Korkstaub befreiten, durchbohrten Korken, in dem ein möglichst direkt über ihm abgebogenes weites Dampfableitungsrohr steckt, das in einen Kühler mündet, verschlossen und mittels eines Ringes, der Einkerbungen zum Durchleiten des Wasserbaddampfes besitzt, auf das Wasserbad gestellt. Kolben und Ableitungsrohr werden dann mit einem oben geschlossenen Blechmantel überdeckt, der an einer Seite zur Durchführung des Ableitungsrohres geschlitzt ist. Das Wasserbad wird dann so stark erhitzt, daß die in den Blechmantel steigenden Dämpfe diesen und damit auch Kolben und Ableitungsrohr mit erwärmen und so jegliches Dephlegmieren der Benzoldämpfe verhindern. Nach dem Eindampfen wird etwas Alkohol (absoluter oder 96 vH) zugegeben, um etwa vorhandenes Wasser zu verjagen, und der Kolben offen und liegend auf das mit gewöhnlichem Ringe versehene Wasserbad gestellt, so daß die schweren Dämpfe bequem abfließen können. Dann wird der Kolben in einem auf 105° eingestellten Trockenschrank 10 min lang getrocknet und nach dem Erkalten gewogen. Die gefundene Teermenge wird mit 2,5 multipliziert und die Verteerungszahl vH errechnet.

b) Abgekürzte oder Natriumsuperoxyd-Methode (Na₂O₂). Falls die Ergebnisse dieser Methode den Grenzwert überschreiten, muß zur Kontrolle die allgemeine Methode (a) verwendet werden.

Bei Ausführung der Natriumsuperoxyd-Methode kommt die 70stündige Vorbehandlung mit Sauerstoff in Fortfall. In den 400 cm³ fassenden Erlenmeyer-Kolben, der absolut trocken sein muß, werden 3 g des Natriumsuperoxydes eingewogen. Dazu werden 50 g des frischen, filtrierten Öles gegeben und danach 50 cm³ der oben beschriebenen alkoholisch-wässerigen Lauge hinzugefügt. Der Kolben wird mit Rückflußkühler verschlossen und auf dem Wasserbade vorsichtig unter häufigem Umschütteln 20 min lang erwärmt. Wird die Reaktion zu heftig, so muß zwischendurch der Kolben vom Wasserbade entfernt werden.

Die weitere Arbeitsweise ist die gleiche, wie oben geschildert, nur mit der Änderung, daß zum Ansäuern der Lauge eine größere Menge Salzsäure erforderlich ist.

Zu § 11.

1. Entnahme der Probe. Das zu untersuchende Öl soll dem-Apparat (z. B. Transformator oder Ölschalter) möglichst an einer Stelle entnommen werden, die dem tiefsten unter Spannung stehenden Teil nahe-liegt. Die zur Entnahme der Probe dienenden Gefäße müssen peinlich sauber und trocken sein.

Die Temperatur des zu untersuchenden Öles soll 15–25° C betragen.

2. Elektrodenform und Abstände innerhalb der Prüf-apparate.

Als Elektroden werden Kupferkalotten von 25 mm Halbmesser nach nebenstehender Skizze gewählt.

Der Abstand der Kalottenränder von der Gefäßwandung (Glas oder Porzellan) soll mindestens 12 mm betragen.

Bei Einführung beider Elektroden vom Ölspiegel aus soll der Mindestabstand zwischen den Zuleitungen 45 mm betragen. Die Zuleitungen selbst sollen einen Durchmesser von mindestens 5 mm haben.

3. Ölmenge. Die Ölmenge soll mindestens 0,25 l betragen.

4. Reinigung. Die Elektroden und das Gefäß sind vor jeder Versuchsreihe mit einem Lederlappen blank zu reiben und mit Benzol zu reinigen. Der gereinigte Apparat ist vor dem Versuch möglichst mit einem Teil des zu untersuchenden Öles auszuspülen.

5. Versuchsanordnung. Zwei Versuchsanordnungen sind zulässig:

A. Fester Elektrodenabstand. Der Abstand der Kalotten soll bei dieser Versuchsanordnung 3 mm betragen.

Die Spannung wird variiert entweder durch feinstufige Änderung der Erregung, falls ein besonderer Generator vorhanden ist, oder durch Regeln von vor die Niederspannungswicklungen des Transformators geschalteten Widerständen.

B. Variabler Elektrodenabstand bei konstanter Spannung. Auf der Hochspannungsseite soll ein fester Widerstand von etwa 30000 Ω vorgeschaltet sein.

Der Prüftransformator soll bei beiden Versuchsanordnungen bei voller Erregung mindestens 30 kV auf der Hochspannungsseite geben. Die Leistung

darf nicht weniger als 250 VA betragen. Bei größeren Transformatoren ist u. U. durch Vorschalten von Flüssigkeitswiderständen dafür zu sorgen, daß der Hochspannungsstrom beim Ansprechen der Funkenstrecke nicht mehr als 0,5 A beträgt. Zur Regelung oder Dämpfung sind nur Metall- oder Flüssigkeitswiderstände zulässig.

6. Verlauf der Untersuchung. Beim Eingießen des Öles sind Luftblasen nach Möglichkeit zu vermeiden, indem man das Öl an der Gefäßwand langsam herunterlaufen läßt.

Vor Anlegen der Spannung soll das Öl 10 min im Prüfgefäß ruhig stehen.

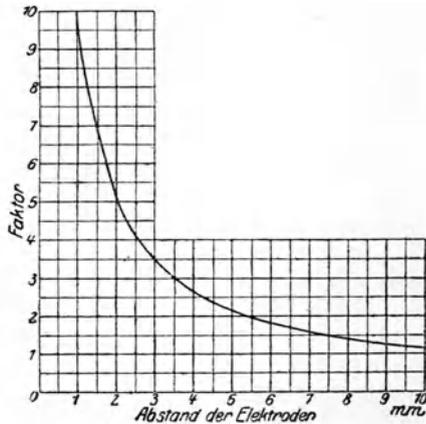
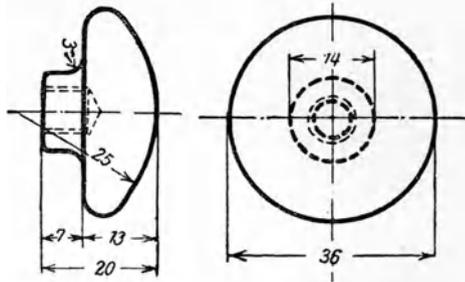
Die Regelung der Spannung bzw. des Elektrodenabstandes soll bis zum Durchschlag ungefähr 20 s erfordern. Die Spannung soll möglichst schnell nach dem Durchschlag abgeschaltet werden.

Im ganzen sind 6 Durchschlagsversuche anzustellen. Das Ergebnis des ersten Versuches darf zur Beurteilung des Öles nicht herangezogen werden. Maßgebend ist der Mittelwert der letzten 5 Durchschläge.

Nach jedem Durchschlag ist das Öl zwischen den Elektroden durch Umrühren mit einem reinen und trockenen Glasstäbchen zu erneuern.

Um die Durchschlagfestigkeit in kV/cm zu ermitteln, ist bei Methode A der gefundene Mittelwert der Durchschlagsspannung mit dem Faktor 3,5 zu multiplizieren.

Bei Methode B ergibt sich der Faktor aus der vorstehenden Kurve.



4. Die Bestimmung der Verteerungszahl gibt nach neuen Untersuchungen zu Bedenken Anlaß, und zwar deshalb, weil nach der vorgeschriebenen Prüfmethode ausschließlich die Befähigung der Säuren, Schlamm zu bilden, festgestellt wird. Die übrigen Möglichkeiten, welche hier bestehen, das Öl zu polymerisieren, werden auf diese Weise nicht erfaßt, z. B. sind die katalytischen Einflüsse der Metalle unberücksichtigt geblieben. Auch diejenigen Reaktions- und Zwischenreaktionsprodukte bleiben ausgeschaltet, welche in kaltem Öl unlöslich sind, sich in heißem Öl aber in Lösung befinden und Ablagerungen auf den Kühlschlangen bilden, welche der Wärmeleitung dienen.

Die Prüfung mit Natriumsuperoxyd hat keine befriedigenden Ergebnisse gehabt.

Im Gegensatz zu der in § 10 vorgeschriebenen Prüfmethode gehen die englischen Verbände so vor, daß sie die katalytische Wirkung des Kupfers durch Einlegen eines Streifens dieses Metalls in das zu prüfende Öl berücksichtigen und 45 Stunden lang bei einer Erhitzung des Öles auf 150° C Luft durchsaugen. Es darf nicht mehr als 0,05 vH Schlamm entstehen, falls das Öl als brauchbar angesehen wird. Auf diese Weise kommen stark oxydierende Wirkungen, besonders durch die labilen Persäuren, zustande, welche bei den im Betrieb sich abspielenden Prozessen in der Tat gar nicht vorhanden sind (Sludgemethode).

Eine Untersuchung des Öles, welche den praktischen Bedingungen im Transformator besser entspricht, indem sie die Schlamm- und Säurebildung erfaßt, stammt aus dem Schweizer Laboratorium vom BBC. Das Öl wird bei 112° C in zehn offenen Kesseln aus Kupfer unter Luftzutritt erhitzt. Die einzelnen Gefäße von 1,2 l Inhalt sind mit je 1 l Öl gefüllt und enthalten außerdem einen Kupferdorn, welcher mit Baumwollgarn von bestimmter vorher festgestellter Festigkeit bewickelt ist. Weiter sind in jedem Ölkessel drei Reagenzgläser, in welchen sich außer dem Öl Kupferspäne und ein mit Baumwollgarn bewickelter Kupferdorn befinden. Sie besitzen am Ende eine Ausdehnungskugel und sind so von der umgebenden Luft abgeschlossen. Diese 10 Gefäße mit Inhalt werden in einem elektrisch geheizten Ölbad 3 Stunden der schon vorher genannten Temperatur von 112° C ausgesetzt. Nach 100 Stunden wird ein Reagenzglas auf Farbenänderung hin in Augenschein genommen und das Baumwollgarn auf Zu- bzw. Abnahme seiner mechanischen Festigkeit in der Zerreißmaschine geprüft, indem man dabei aus 15 Zahlenwerten das Mittel nimmt. Man vergleicht dieses Mittel mit dem Wert der Festigkeit, welche derartiges Garn beim Liegen im Öl besitzt, als es von der Raffinerie kam.

In derselben Weise wird das Garn geprüft, welches sich auf den Kupferdornen der mit Luft in Berührung stehenden Kesseln befindet. Eine Probe des gut durchgerührten Öles wird entnommen und gestöpelt stengelassen, damit sich der Schlamm, eventuell mit Benzin versetzt, am Boden niederschlägt. Nach 24 Stunden stellt man, gegebenenfalls mittels Zentrifugierens, fest, wieviel Volumenprozent sich flockig oder sandig abgeschieden haben. Außerdem wird festgestellt, ob und in welchen Prozentsätzen der Schlamm in Öl von 70° C löslich ist.

Nach 200- und nach 300stündiger Erhitzung werden die gleichen Ermittlungen wie vorher ausgeführt. Man gelangt so, von der Wirkung des elektrischen Feldes abgesehen, zu einem Abbild der in Praxis auftretenden Verhältnisse und ist in der Lage, den Angriff des Öles auf die Baumwollumspinnung kennenzulernen. Mehr wie 0,3 vH Schlamm darf das Öl, wenn es brauchbar sein soll, nicht enthalten.

Auch im Chemischen Laboratorium der AEG-Transformatorfabrik wird die Ansicht vertreten, daß z. B. überraffinierte Öle hinsichtlich ihrer Verteerungszahl den Anforderungen genügen würden. Sie setzen aber erheblich mehr Schlamm ab, wie nach der Höhe dieser Verteerungszahl vorausgesetzt wird. v. d. Heyden und Typke befürworteten deshalb, neben der Verteerungszahl noch die Schlammbildung festzustellen. Ihr Vorschlag geht dahin, das in 70stündiger Erhitzung auf 120° C bei gleichzeitiger Sauerstoffeinleitung verteerte Öl auf Schlammbildung zu untersuchen. Hat sich jetzt schon ein schlammiger Niederschlag eingestellt, so ist das Öl ohne weiteres als nicht brauchbar zu bewerten. Sonst sind 50 g auf die Bestimmung der Verteerungszahl laut VDE.-Vorschrift zu verwenden. Auf Schlamm hin wird unter Anlegen an die BBC-Prüfung untersucht, indem man 7,5 cm³ Öl mit der dreifachen Menge Normalbenzin versetzt und nach 12stündigem Stehen den Schlammgehalt mißt.

5. Auch über die Festlegung des Flammpunktes gehen die Meinungen auseinander, weil ein zu hoher Flammpunkt einen hohen Stockpunkt zur Folge hat.

6. Wie auch schon vom VDE ausgesprochen wird, werden voraussichtlich im Laufe dieses Jahres noch Änderungen der „Vorschriften für Transformatoren- und Schalteröle“ vorgenommen.

7. Das Entwässern der Öle, bevor sie in die Apparate gefüllt werden, nimmt man z. B. dadurch vor, daß man sie auf ca. 110—120° erhitzt. Die dabei entstehenden Abdampfverluste sind nicht unbedeutend, die letzten Feuchtigkeitsspuren gehen aber so nicht heraus, weil in Ölen die Wasserkügelchen eine starke Siedepunktverzögerung erleiden. Heißes Öl saugt Feuchtigkeit stärker auf wie kühles.

Besser verfährt man, wenn unter Vakuum erwärmt wird. Bei 30 bis 40 cm Quecksilbersäule findet eine bessere Entfeuchtung statt, teerige Reaktionsprodukte treten hierbei weniger auf. Allerdings pflegen auch hier einige flüchtige Bestandteile abzugehen. Chemische Umsetzungen treten bei allen diesen Erwärmungen im Öl ein.

Über den Einfluß, welchen der Wassergehalt im Öl ausübt, verdanken wir R. M. Friese bedeutsame Aufklärungen, welche in den wissenschaftlichen Veröffentlichungen aus dem Siemenskonzern, I. Bd., 2. Heft, niedergelegt sind.

Da sich der Gehalt des Wassers in Öl quantitativ schwer bestimmen läßt, ist hier so vorgegangen, daß sorgfältig getrocknetes Öl mit gewogenem destilliertem Wasser versetzt und kräftig geschüttelt wurde, so daß eine Emulsion eintritt. Man kann unter dem Mikroskop die kleinen Wasserkügelchen, deren Durchmesser ungefähr $\frac{1}{100}$ mm be-

trägt, besonders in gefärbtem Zustande, erkennen, sie umgeben beim Filtrieren durch Papier die Fäserchen, ohne daß sie in dieselben eindringen. Friese stellt bei Benutzung von Zylinderfunkenstrecken folgende Gleichung für die Durchschlagsfestigkeit D in kV/cm auf: $D = \frac{1,1 + 20}{W}$, wo W der Wassergehalt in Tausendstel des Ölgewichtes ist.

Hieraus ergibt sich, daß der Durchschlagswert nicht unter 20 kV/cm heruntergeht. Wahrscheinlich nimmt das Öl nur eine bestimmte Menge Wasser auf und lagert den Überschuß am Boden ab. In der Zeit, als die Betriebsspannungen im Transformator niedriger wie jetzt waren, genügte das Öl damals den gestellten Anforderungen.

Die elektrischen Festigkeiten, welche man bei den technisch üblichen Trocknungsverfahren erreicht, sind nicht größer als im Höchsfalle 130 kV/cm , wieder gemessen bei Anwendung von Zylinder-Funkenstrecken unter Benutzung sinusförmigen Wechselstroms von 50 Per/sek . Man gelangt aber, wie hier weiter ermittelt wurde, durch zweistündige Erhitzung einer kleinen Ölprobe auf 110° C bei gleichzeitiger Luftleere von 10^{-4} cm Quecksilber und Benutzung eines Wattefilters bei Anlegen von zwei runden Elektroden von 10 mm Durchmesser im Abstand von $2,3 \text{ mm}$ zu einem elektrischen Festigkeitswert von 230 kV/cm . Es wurde auch noch die Eigenschaft des entfeuchteten Öles, aus der Luft von 80 vH Feuchtigkeitsgehalt Wasserdampf aufzusaugen, durch Messung der elektrischen Festigkeit untersucht. Nach 1, 3, 5 und 15 Tagen fiel die Durchschlagsfestigkeit von 145 kV/cm auf 100, 60, 40 und 20 kV/cm . Es ist aber weiterhin beobachtet, daß feuchtes Öl an trockene Luft Wasser abgibt. In einem Falle stieg die elektrische Festigkeit des Öles innerhalb 10 Tagen von 25 auf 130 kV . Dann wurde ermittelt, daß Öl, welches über Wasser steht, nur langsam mit Wasser verunreinigt wird. Man soll es deshalb von unten abziehen. Den Einfluß des Luftdruckes auf die elektrische Festigkeit reiner entfeuchteter Öle stellt Friese nach der Näherungsformel fest: $D = 86 + 0,08 B \text{ kV/cm}$, wo B der Barometerstand in Millimeter Quecksilbersäule ist. Die täglich schwankenden Barometerstände verursachen daher nur Störungen von rund 2 vH . Mit steigender Temperatur sind die Öle dünnflüssiger und elektrisch fester. Eine Ölsorte hatte bei $60\text{--}70^\circ \text{ C}$ ihren Höchstwert, welcher dann etwas abnahm. Beobachtet wurden für 20° und 65° Werte von 130 bzw. 175 kV/cm . Friese berechnet für den Grad Celsius bei den üblichen Zimmertemperaturen einen Koeffizienten von $1,5\text{--}3 \text{ kV}$.

Daß geringer Wassergehalt in Öl dessen Durchschlagsfestigkeit herabsetzt, ist schon hervorgehoben. Dies geschieht aber auch noch außerdem durch Verunreinigung des Öles mit Fasern und Suspensionen. Man schickt deshalb das Transformatorenöl ein oder mehrere Male durch gewöhnliche Filter, pergamentierte Hartfilter von Schleicher & Schüll, Ultrafilter, Kolloidmembranen, Massen aus Aluminiummagnesiumhydrosilikaten, teils unter Druck und neuerdings auch kalt oder warm durch Zentrifugen. Das Zentrifugieren entfernt Wasser und Unreinigkeiten zugleich. Es macht sich hier der Nachteil bemerk-

bar, daß die Luft reichlich Gelegenheit findet, sich in besonders starkem Maße im Öl zu lösen. Im Transformator ist durch die Drahtumspinnung und durch Hartpapierisolierstoffe immer Gelegenheit vorhanden, daß Fäserchen von Baumwolle und Papier, ebenso Tränkstoffe, z. B. Bakelitesuspensionen, ins Öl gelangen.

Gebrauchte Öle mit Hilfe von Fullererde (Aluminiummagnesiumhydrosilikate) so zu reinigen, daß sie wieder gut verwendungsfähig werden, ist nach den Feststellungen von v. d. Heyden und Typke ETZ, 1925, S. 1518 nicht unter allen Umständen möglich. So ist diese Methode dann nicht zugänglich, wenn ein hoher Säuregehalt vorhanden ist. In diesem Fall bleiben erhebliche Säuremengen sowie teerige Bestandteile im Öl zurück. Dagegen bewirkt die Behandlung der Öle von niedrigem Säuregehalt mit Fullererde eine hinreichende Erniedrigung von Säure- und Verteerungszahl.

8. Nimmt man die höchstzulässige Temperatur des Öles von 95° an, so werden die Wickelungen schätzungsweise auf 150° C erwärmt. Wie hier der Zellstoff vom Öl verändert wird, kommt auf die Ölzusammensetzung an. Ölverbindungen, welche leicht Sauerstoff abgeben, können zur Bildung von Oxyzellulose führen, also große Zerstörungen verursachen. Hydrozellulose verringert die mechanische Festigkeit auch. Es gibt aber auch Ölteile, welche derart auf Baumwolle wirken, daß Zellulosehydrat, ein Quellungsprodukt, entsteht, welches die Baumwolle fester macht. Abscheidungen von Verunreinigungen auf den Windungen schaden nicht nur wegen der verringerten Wärmeabfuhr, sondern bewirken auch einen starken Angriff des elektrischen Feldes.

9. Bei der Reinigung des Öles durch Zentrifugen wird vom Boden des Transformators das Öl abgesaugt. Zweckmäßig ist, daß es so wenig wie möglich an die Luft kommt. Nachher, wenn es die Fliehkrafttrennung durchgemacht hat, kann man es noch über Hartfilter schieben und erreicht elektrische Festigkeiten von 300 kV/cm. F. Schröter, welcher auch den vorher genannten Wert gefunden hat, gibt im Arch. f. El. Bd. 12, Heft 1, an, daß durch Fasern und Wasser verunreinigtes Öl derart in seiner Durchschlagsfestigkeit streut, daß diese nicht zu definieren ist, weil durch das Feld Feuchtigkeit und Schmutz zwischen die Elektroden gesaugt wird.

Ob die Faserteilchen oder sonstige Unreinigkeiten dazu beitragen, Wasser aus der Luft anzunehmen, oder ob diese Neigung allein dem Öl zukommt, ob wasserfreies Öl mehr Anziehung zum Wasserdampf in der Luft besitzt oder umgekehrt, ferner, in welchen Beziehungen die Öltemperatur zu diesen Erscheinungen steht, ist bislang mit voller Sicherheit noch nicht anzugeben. Ebenso ist unsicher, wie die Mengen der suspendierten Fasern sich zur elektrischen Festigkeit des Öles verhalten und wie die Temperatur und das elektrische Feld, sowie die Lufteinschlüsse im Öl und die Schlierenbildung chemische Umsetzungen hervorrufen, d. h. die Stromleitung begünstigen.

10. Werden verschmutzte, lange in Gebrauch gewesene Öle untersucht, hat man gefunden, daß diese trotz großer Verschlammung und starker Anreicherung von Säuren noch eine gute Durchschlagsfestig-

keit aufweisen, welche um 40 kV/cm herum beträgt. Aber wegen der Angriffe der Säuren auf die Umspinnung ist dieses Öl nicht mehr gebrauchsfähig. Im Schlamm befinden sich außer hochmolekularen asphaltartigen Verbindungen Eisen- und Kupferseifen, Fasern verschiedener Art und Verunreinigungen, welche durch das Arbeiten der Bedienungsmannschaften in den Transformator hineingelangt sind.

11. Unter Benutzung einer Zylinderfunkenstrecke wurden Versuche über die Leitfähigkeit von Transformatorölen von K. Draeger vorgenommen, Arch. f. El., Bd. 13, Heft 5. Er hat die Leitfähigkeit bei kurzen Stromdurchgängen gemessen, ebenso nach einer Dauer von 6 Minuten. Sie klingt im zweiten Fall langsam ab, erreicht bei Unterbrechung aber wieder ihren Anfangswert. Die Anfangsstromstärken richten sich annähernd nach dem Ohmschen Gesetz, dagegen trifft dies bei Änderungen des angelegten Potentialgefälles nicht mehr zu, wenn dieses sich längere Zeit betätigt. Beachtenswert für die Herstellung elektrisch fester Öle ist die Beobachtung, daß Suspensionen und Emulsionen nur einen geringen Einfluß auf die Leitfähigkeiten ausüben, dagegen gehen diese bei einem Wasserzusatz in feinverteilter Form sofort stark herauf. Ebenso steigen sie mit der Erwärmung des Öles. Es wurde hier der annähernde Verlauf nach einer Exponentialfunktion festgestellt.

Über die Ursache der Leitfähigkeit kommt Draeger auf Grund seiner Untersuchungen zu der Ansicht, daß diese durch gelöste und elektrolytisch gespaltene Fremdstoffe hervorgerufen wird, zu einem nur geringen Anteil durch Eigendissoziationen und äußere Strahlung.

Er beschäftigt sich dann weiter mit Durchschlagsversuchen und ist der Meinung, daß bei den technisch gereinigten Transformatorölen der Durchschlag fast immer durch Fasern und diesen ähnlichen Stoffen, welche sich an den Elektroden befinden, veranlaßt wird. Deshalb erblickt er in Messungen mit Gleichstrom ein Reagenz für die Verunreinigung mit Suspensionen. Öl, welches einem ganz besonders sorgfältigen Verfahren zur Entfernung aller Fremdkörper unterzogen wurde, zeigt zwischen Kugelelektroden von 20 mm Durchmesser im Abstand von 1,75 mm bei langsamer Vergrößerung des Potentialgefälles und sinusförmiger Spannung von 50 Per/sek Durchschlagsfestigkeiten von mehr als 400 kV/cm. Bis zu 2 mm Entfernung der Elektroden von einander ändert sich die elektrische Festigkeit in starker Weise, von 2—10 mm nimmt sie weniger schnell ab. Bei Wechselstrom ist sie größer wie bei Gleichstrom, nimmt mit dem Wachsen der Periodenzahl erst schneller, dann langsamer zu.

Erwärmungen des Öles im Intervall zwischen 15 und 60° C bedingen ein gleichmäßiges Steigen der Durchschlagsfestigkeit, welche mit dem umgekehrten Wert der Viskosität annähernd proportional geht.

Verfasser ist nicht der Überzeugung, daß der Fasergehalt unter allen Umständen die Veranlassung zu einem wesentlichen Rückgang der elektrischen Festigkeit des Öls ist. Er stellte feuchtigkeitsfreie Fasern von Kraftzellstoff und Baumwolle durch Auskochen mit wasserfreiem Benzol her und füllte diese bei Luftleere getrockneten feinen

Substanzen in reichlicher Menge in frisches entwässertes Öl. Dabei ergaben sich Durchschlagsfestigkeiten um 380 kV/cm herum, und zwar auch dann, wenn unter Luftabschluß das Öl durch Eisen oder Kupfer katalytisch beeinflusst war.

Sowie das Öl aber Luft und Feuchtigkeit in genügender Weise aus der Luft aufgenommen hatte, ging die Durchschlagsfestigkeit herunter. Es ist anzunehmen, daß jetzt die vereinigte Wirkung von elektrischem Feld, Luft, Wasser und Faserstoffen an der Verschlechterung des Öls schuld ist. Die Fäserchen saugen schnell Feuchtigkeit und Säuren auf, die Oxydation der Transformatorenöle kann bis zur Bildung von Ameisensäure erfolgen.

Bei Wasser in Form von kleinen Tropfen besteht infolge seiner hohen Dielektrizitätskonstanten im starken elektrischen Felde zweifellos ein großer Wanderungszwang, es werden notwendigerweise dadurch auch andere Bestandteile veranlaßt, sich endosmotisch zu betätigen. Ob die Auffassung von Gyemant, Zeitschr. f. Phys., Bd. 33 (1925), S. 789, richtig ist, daß die feinen Wassertropfchen durch Streckung und Auseinanderlagerung leitende Fäden in Öl bilden, kann nicht ohne weiteres entschieden werden. Aber der große Unterschied in den Dielektrizitätskonstanten der beteiligten Stoffe läßt zum Teil derartige Erscheinungen zu.

Die Eigenschaften der vielen feinen aufsaugungsfähigen Fäserchen sind auch insofern zu beachten, als dadurch Trennungen in den schwer und leichtflüssigen Ölbestandteilen sowie ihrer Zersetzungsprodukte und Beimengungen herbeigeführt werden. Es entstehen also auch auf diese Art Stoffe, welche sich elektrostatisch wie auch in bezug auf ihre elektrische Leitfähigkeit voneinander unterscheiden.

12. Draeger hat ferner die Vorgänge bei dem elektrischen Durchbruch der Transformatorenöle noch unter der Bestrahlung mit ultravioletttem Licht, Röntgen- und Radiumstrahlen studiert, um Aufschluß zu erlangen, wie sich die Verzögerung vollzieht. Er findet, daß selbst bei kräftiger Dosierung der Strahlen nur eine geringe Herabsetzung der an und für sich bedeutenden Durchbruchverzögerung stattfindet und kommt zum Ergebnis, daß der Gehalt an Ionen, welche durch ein intensives elektrisches Feld zum Spalten von Molekeln und für die Bildung weiterer Ionen befähigt sind, in der Nähe der Elektroden gering sein muß.

Dieses Verhalten ist für den Hersteller elektrisch fester Öle außerordentlich interessant und bedeutet Fingerzeige, nach welcher Richtung hin sich die Zusammensetzung günstiger gestalten läßt.

W. Späth hat schon früher im Arch. f. El. 1923, Bd. 12, Heft 14, mitgeteilt, daß Bestrahlungen von Transformatorölen mit Radium und ultravioletttem Licht die Verzögerung des elektrischen Durchbruchs nicht beeinflussen. Er arbeitete mit der von Schumann angegebenen Elektrodenform von 90 mm Durchmesser aus Rotguß, sinusförmigem Wechselstrom von 50 Per/sek und Elektrodenabständen von 1—8 mm. Die elektrische Festigkeit innerhalb 2—3 mm Entfernung beträgt bis zu 375 kV/cm.

Bei Gleichstrom konnten Polarisationsvorgänge festgestellt werden.

Die Untersuchungen von Draeger und Späth können die Ansichten von Günther—Schultze in seinem Buch über die dielektrische Festigkeit stützen, welche die Ähnlichkeit des Durchschlages in Flüssigkeiten mit dem Durchbruch in Gasen hervorheben. Die Ionen der Flüssigkeiten werden zum Teil durch das elektrische Feld in Reaktionsprodukte übergeführt, welche gewissermaßen Fäden oder Bahnen von Gasen oder Dämpfen bilden, andere Ionen werden mehr beschleunigt als die eben genannten und bewirken durch Aufprall auf neutrale Molekeln, daß diese in Ionen zerfallen und sich an der elektrolytischen Wanderung, d. h. der Zerstörung der Isolierstoffe beteiligen.

13. Zum Messen der Durchschlagsfestigkeit von Transformatoren- und Schalterölen hat die A.-G. Siemens & Halske einen Apparat konstruiert, welcher Prüfungen nach den Vorschriften des VDE ermöglicht. Das Prüfgefäß ist für die Aufnahme von 1 l Öl eingerichtet und besitzt Kupferelektroden, welche als Kugelkalotten von 50 mm Durchmesser ausgebildet sind und eine konstante Entfernung von 3 mm voneinander haben. In einem fahrbaren Gehäuse ist außer diesem Ölbehälter noch der Hochspannungstransformator untergebracht, welcher bis zu 30 kV Spannung heraufreicht. Mit einem Dreiseiten-Spannungsmesser wird die elektrische Festigkeit des Öles ermittelt.

14. Von der American Society For Testing Materials sind 1920 Messungen über das Verhalten von Transformatorenölen bei wechselnden Entfernungen der Elektroden und Elektrodenformen sowie bei verschiedenen Temperaturen veranlaßt. Außer einem übersichtlich zusammengestellten Zahlenmaterial ist nichts Besonderes dabei herausgekommen. Die Ergebnisse lassen sich schwer mit unseren vergleichen, weil Angaben über den Zustand der Öle fehlen. Der Temperaturkoeffizient von 1,3 kV/Grad erscheint sehr niedrig. Es wurden bei jeder Füllung des Prüfgefäßes 5 Durchschläge bei einer Temperatur von 25°C vorgenommen. Die Zirkulation des Öles an den Elektroden hat die Prüfungsergebnisse nicht nennenswert beeinflußt. Es wurden auch Untersuchungen elektrischer Öle nach den deutschen und englischen Richtlinien vorgenommen, wobei sich herausstellt, daß die Bestimmung der Verteerungszahl ganz grob voneinander abweichende Güteergebnisse hervorbringt.

15. In Frankreich hat die Union des Syndicats de l'Electricité 1920 Lieferungsbestimmungen angenommen, welche in der Revue Generale de l'Electricité 1920, Bd. 7, S. 727 veröffentlicht sind. Fr. Frank hat darüber in der ETZ 1921, S. 982 referiert. Es werden folgende neun Forderungen aufgestellt:

1. Rückstandsbildung; 2. Flamm- und Brennpunkt; 3. Viskosität bei verschiedenen Temperaturen; 4. Gewichtsverlust beim Verdampfen; 5. spezifisches Gewicht; 6. Stockpunkt; 7. Gehalt an Säuren, Alkalien und Schwefel; 8. Prüfung auf Feuchtigkeit; 9. elektrische Festigkeit.

Nach fünfständigem Erhitzen auf 150°C darf sich keine Rückstandsbildung zeigen, nach 50 Stunden gleicher Behandlung darf sie nicht größer wie höchstens 0,06 vH sein und nach 135 Stunden wie

0,3 vH. Man verfährt so, daß 10—12 Gramm Öl im Reagenzglas ins Ölbad gebracht werden. Der Niederschlag wird mit Petroläther aufgenommen und auf ein gewogenes Filter gespült, dann mit Tetrachlorkohlenstoff extrahiert. Lösliches und Unlösliches wird bestimmt, die löslichen asphaltartigen Stoffe sollen die vorher benannten Prozentsätze nicht übersteigen.

Ferner wird das Öl durch einen Färbeversuch beurteilt. Das vom Schlamm abfiltrierte Öl wird mit Amylalkohol und mit dem angelieferten Öl verglichen. Die Methode erscheint nach Fr. Frank unsicher.

Bei den französischen Prüfmethode ist also die katalytische Kupferwirkung unberücksichtigt gelassen.

Im übrigen scheinen die französischen Bestimmungen noch zu sehr auf die amerikanischen Öle eingestellt.

Der Punkt 4 der Bestimmungen ist aber beachtenswert, nämlich die Verdampfbarkeit. Nach fünfstündiger Erwärmung auf 100° C sollen bei Verwendung von 150 g Öl nicht mehr wie 0,2 vH flüchtige Stoffe abgehen. Diese Forderung läßt wichtige Schlüsse auf die Zusammensetzung des Öles zu. Selbst geringfügige leicht abtreibbare Bestandteile sind unter hoher Felddichte gefährlich.

Zur Bestimmung der elektrischen Festigkeit füllt man das Öl in einen Glaszylinder von 35 mm Durchmesser und legt zwischen zwei Kugeln von 12,5 mm Durchmesser und 5 mm Abstand eine Wechselstromspannung von 40 kV an. Durchschlag darf nicht erfolgen, wenn das Öl gebrauchsfähig sein soll.

16. Aus allem, was über Öle und besonders über das Verhalten von Ölen unter der Einwirkung des elektrischen Feldes mitgeteilt wurde, beweist, daß die hier auftretenden vorliegenden Verhältnisse recht verzwickelt liegen. Es treten deshalb in den Forschungsarbeiten auch gegensätzliche Ansichten auf. Jedenfalls darf man nicht nur die chemische Einwirkung des Sauerstoffes auf die Ölbestandteile allein berücksichtigen, sondern auch die Wirkung der angelegten Potentialdifferenz und die sekundären Erscheinungen, welche durch die verschiedenen Öldestillate, Faserverunreinigungen, Luft und Wasser hervorgerufen werden.

17. Um das Öl gegen die Einwirkungen des Luftsauerstoffes besser zu schützen, legt die General Electric Co. die Transformatorenwindungen in Öl, welches von einer chemisch trägen Gasschicht umgeben ist, und erzielt dadurch eine geringere Verteerung. Im chemischen Laboratorium der AEG-Transformatorenfabrik stellen v. d. Heyden und Typke fest, daß Öle, in die Stickstoff oder Kohlensäure eingeleitet wird, nicht mehr zersetzlich sind und auch durch Metalle nicht katalytisch beeinflusst werden. Sie halten eine Behandlung mit derartigen indifferenten Gasen vor oder bei der Raffination für besonders zweckmäßig.

Daß der Ersatz der chemisch und dielektrisch schädlichen in Öl gelösten Luft durch ein nicht reaktionsfähiges Gas vorteilhaft ist, unterliegt keinem Zweifel. Es müßte aber die Methode insofern grund-

sätzlich geändert werden, indem man durch Luftleere kurz vor der Füllung des Transformatorgefäßes erst alle Luft und Feuchtigkeit aus dem Öl herausholt, damit sämtliche gefahrbringenden Stoffe verschwinden und dann erst die Sättigung mit Stickstoff, Kohlensäure, Argon, Neon u. a. vornimmt. Derartige Gase können unter Umständen auch in kondensierter Form zum Sättigen verwendet werden. Ob unter einer solchen Stickstoffschicht eine jahrelang dauernde Bewahrung des Öles vor Säurebildung und Schlammabscheidung möglich ist, kann nur der Betrieb entscheiden. Es steht ja auch nichts im Wege, durch Nachfüllung von kondensiertem Gas die Luftfreiheit aufrecht zu erhalten. Auf alle Fälle deutet aber das vorliegende Versuchsmaterial darauf hin, daß die Lagerung elektrischer Hochspannungsapparate unter luftfreiem Öl Aussicht auf eine erhebliche Verbesserung der elektrischen Festigkeit hat. Ferner ist zu erwägen, die indifferenten Gase und damit die ganze innere Apparatur unter Gasdruck zu setzen und in diesem Zustand dauernd zu belassen.

18. In einer sehr eingehenden Untersuchung, die im Dettmarschen Laboratorium in Hannover entstanden ist, hat L. Hentschel Beiträge über das dielektrische Verhalten ölgetränkter Papiere geliefert, welche im Arch. f. El. Bd. 15, Heft 2, 1925 veröffentlicht sind. Er ging aus von ungeleimten Zellulosepapieren großer Aufsaugefähigkeit, welche mit russischem Transformatorenöl, ferner mit amerikanischem Transformatorenöl und dann noch mit Vaseline und Paraffinöl getränkt wurden. Und zwar geschieht dies in Anlehnung an die Praxis dadurch, daß die Papiere im Trockenofen von Feuchtigkeit befreit und schnell in ein Gefäß übergeführt werden, welches die gereinigten Öle enthält. Im Ölbad wird das Gefäß auf 90—100° C erwärmt und der Inhalt mit einer Wasserstrahlpumpe einige Stunden luftleer gemacht.

Bei den Messungen des Verlustwinkels, die mit der Schering-schen Brücke vorgenommen wurden, stellt sich an den fertig imprägnierten Papieren eine große Inkonzanz heraus. Als Grund hierfür wird das Vorhandensein von Luft im Dielektrikum angesehen. Aber selbst bei sorgfältigster Imprägnierung unter verstärkter Luftleere bleibt dieser Zustand bestehen, so daß nur zwei Annahmen bleiben, nämlich 1. ein doch noch Vorhandensein von Luft im getränkten Papier, oder 2. die Befähigung des Öles, analog der Luft selbständige Entladungen zu bilden.

Daß die Oberfläche vieler Stoffe befähigt ist, die Gase festzuhalten, ist bekannt. Bei der Elektrolyse können z. B. in manchen Metallen, wie Paladium, ganz erhebliche Wasserstoffmengen okkludiert werden, welche das Potential und damit den ganzen elektrolytischen Prozeß in wesentlicher Weise verändern. Die Trennung von Metall und Gas kann teilweise nur durch Ausglühen erfolgen. Die große Zähigkeit von Kapillaren, die Luft zu binden, wurde schon im X. Kapitel erwähnt.

Vom Öl wissen wir, daß es schon an sich auf organische Stoffe oxydierend einwirkt, also viel mehr noch bei Vorhandensein von Luft und im elektrischen Felde. Daß in Öl genau wie in Luft Glimm-

Streifen-, Büschelentladungen und Durchschläge stattfinden, kann als Folge einer elektrolytischen mit Gasentwicklung verbundenen Zersetzung angesehen werden. In der Hentschelschen Arbeit finden sich mehrfach Belege dafür, daß der Stromdurchgang durch Öl auf elektrolytische und elektroosmotische Vorgänge zurückzuführen ist.

Bei den Untersuchungen, wie sich der Verlustwinkel oberhalb und unterhalb des Ionisierungspunktes ändert, stellt sich heraus, daß dieser bei Papieren, die nur mit reinem Öl imprägniert sind, sehr tief liegt und sich dies auch nicht durch das Übereinanderlegen mehrerer Lagen erheblich verbessern läßt. Aus diesem Grunde wird für die Kabelisolation dem Öl Harz zugemischt. Mit wachsenden Frequenzen setzt die Ionisierung, also die chemische Zersetzung, eher ein, ebenso mit steigender Temperatur.

Die Vergrößerung der Verschiebbarkeit in den geschichteten Ölpapieren erklärt Hentschel durch eine vergrößerte Oberfläche, welche durch die Glimmentladungen hervorgerufen wird.

Um die ölgetränkten Papiere kennen zu lernen, welche mit einem nichtwasserfreien Öl hergestellt wurden, sind Versuche derart vorgenommen, daß zunächst reines Öl von 183 kV/cm Festigkeit mit beliebigen Mengen destillierten Wassers in Emulsionsform gemischt wurden. Die Durchschlagsfestigkeit ging zuerst schnell herunter bis auf ein Drittel bis ein Viertel, blieb dann aber verhältnismäßig konstant.

Immerhin ist also der Wert nach Hentschel erheblich größer, als ihn Friese (s. S. 97) fand. Es hängen mithin diese Erscheinungen von der Art des Öles ab.

Die Tränkung des vorgetrockneten Papieres mit dem Öl wurde bei Temperaturen von annähernd 100° C vorgenommen, dann wurden die Papiere 15 Minuten lang bei derselben Temperatur erwärmt. Die Verlustwinkel und die Dielektrizitätskonstanten fünfschichtiger Bänder steigen mit dem Wassergehalt, die elektrische Festigkeit des getränkten Isolierstoffes leidet wenig unter dem Wasserzusatz. Wahrscheinlich ist in die Poren und Fäserchen das reine Öl eingedrungen und das Wasser blieb in Tröpfchen draußen hängen.

Interessant ist der Versuch, daß je nach den mechanischen Umständen das Öl im Papier zu wandern vermag. Die Folge sind physikalische und chemische Änderungen.

Die elektrolytische Strombewegung, durch Gleichstrom hervorgerufen, wurde im zeitlichen Verlauf des Nachlade-, Rückstands- und Leitungsstroms untersucht und mit den Wechselstrommessungen verglichen.

Technisch wertvoll wird es sein, die Imprägnierung unter Abschluß von Luft in indifferenten Gasen vorzunehmen und dieselben Prüfungen anzustellen, wie es Hentschel gemacht hat.

19. Um die Parallität mit elektrolytischen Vorgängen zu zeigen, kann die Beobachtung von V. Engelhardt¹⁾ beitragen, welcher die dielektrische Festigkeit isolierender Öle gemessen hat. Er fand, daß

¹⁾ Arch. f. El. Bd. 13, S. 150.

sich an Kugelelektroden, welche mit Benzol abgespült waren, sehr niedrige Durchschlagsfestigkeiten des Öles ergeben. Es hat sich eine Wasserhaut gebildet, welche Vorentladungen zuläßt. Werden die Kugeln sorgfältig gereinigt und getrocknet, haben sich Werte von 40 kV/cm elektrischer Festigkeit eingestellt.

Solche Störungserscheinungen sind bei elektrolytischen Prozessen nichts Außergewöhnliches. Man könnte bei Öl auch noch probieren, ob dieselben elektrischen Festigkeiten unter sonst gleichen Bedingungen immer wieder reproduzierbar sind, wenn nach dem ersten Überschlag die Elektroden stets von neuem, ohne gereinigt zu sein, wieder benutzt werden. Und ferner, welche Werte sich ergeben, wenn die Elektroden-Apparatur in Öl unter einem schon vorhandenen Potentialgefälle hineingesetzt wird, das möglichst groß ist.

20. Die Erscheinung, welche verschiedene Versuchsansteller, so auch F r i e s e und D r a e g e r beobachtet haben, daß Öle mit ansteigender Temperatur elektrisch fester werden, was den elektrolytischen Gesetzen widerspricht, kann dadurch seine Erklärung finden, daß die Verminderung der Zähflüssigkeit ein chemisch gleichmäßiger zusammengesetztes Dielektrikum zur Folge hat. Diese Wirkung überwiegt dann bis zu einem Höchstmaß der Erwärmung das sonst eintretende Herabgehen der dielektrischen Eigenschaften. Festgestellt ist, daß die Dielektrizitätskonstanten sich bei Erwärmung des Öls ändern.

21. Es sollen noch Versuche von W. L. Brückman-Delft angeführt werden, welche deshalb interessant sind, weil sie das elektroosmotische Verhalten der Öle im elektrischen Felde zeigen. Infolge einer Rizinusbeimischung hatten sich durch künstliche Beleuchtung deutlich erkennbare Rizinusschlieren in Richtung der Kraftlinien eingestellt. Als man dann Öle verschiedener Dielektrizitätskonstanten mischte, trat die Trennung der Ölbestandteile durch das elektrische Feld wie vorher deutlich zutage. Man konnte beinahe die Entmischung der Flüssigkeit als Faserbildung ansehen.

22. W. L. Brückman und A. C. Piyl haben ferner festgestellt ETZ 1926, S. 14, daß sonst unlösliche Vergußmasse unter der Wirkung des elektrischen Feldes sich in Öl verteilt, also wandert. Dabei hat die elektrische Festigkeit des Öls nicht gelitten.

Ferner stellten diese Forscher fest, daß Papier, welches mit Öl getränkt ist, durch das elektrische Feld an den Kanten der Elektroden oxydiert wird. Wahrscheinlich wird dieser Vorgang durch eine Zersetzung des Öls hervorgerufen.

23. Ende April d. J. tritt in Neuyork die Internationale Elektrotechnische Kommission zusammen, in der Deutschland auch vertreten ist. Auf der Tagesordnung steht u. a. Vorbereitung internationaler Bestimmungen für Prüfmethode von Isolieröl (Transformatoren- und Schalteröl).

24. Für den Elektrotechniker ist es notwendig, daß er mit leichter Mühe feststellen kann, ob das Öl in seinen Transformatoren noch brauchbar ist oder schon eine derartige Zersetzung erlitten hat, daß sich Gefahren vorbereiten. Prof. Edmund Graefe in Dresden, welcher

viele hundert Transformatoröle untersucht hat, gibt hier folgende leicht vorzunehmende Methode an.

In ein Reagenzglas füllt man Natronlauge von 38° Beaumé und darüber das verdächtige stark verbrauchte Öl. Man schüttelt kalt oder unter Erwärmung beide Stoffe tüchtig durcheinander. Ist das Öl nicht mehr verwendungsfähig, bildet sich nach einiger Zeit an der Trennungsfläche der Flüssigkeiten ein dunkler Ring, der aus Reaktionsprodukten entsteht, welche nicht in Öl und auch nicht in der Natronlauge löslich sind.

Tritt dieser schwarze Ring nicht in Erscheinung, kann das Öl ohne Schaden weiterbenutzt werden.

XVIII. Isolierende Lacke.

Zur Herstellung von elektrisch isolierenden Überzügen dienen die Lacke. Sie sind sowohl ihrer Zusammensetzung nach wie in ihren Eigenschaften außerordentlich voneinander verschieden. Es ist genügend Literatur vorhanden, welche hierüber Auskunft gibt.

Während es für die gewöhnlichen Verwendungszwecke meistens genügt, wenn durch die Lackierung gut deckende Überzüge entstehen, kommt bei den Isolierlacken noch hinzu, daß diese tief in das Innere der Gewebe, Papier, Umspinnungen, Umwicklungen eindringen müssen, um auch hier elektrisch isolierende Schichten zu bilden.

1. Wertvolle elektrische Lacke sind z. B. diejenigen, welche aus Kopalen und fetten Ölen hergestellt werden. Kopale sind fossile Harze, die aber nicht ohne weiteres verwendungsfähig sind, sondern zuvor durch Schmelzen eine chemische Umwandlung zu erfahren haben, wobei erhebliche Gewichtsverluste sich einstellen. Unter fetten Ölen versteht man solche, welche durch Oxydation trocknen und fest werden. Das wichtigste ist das Leinöl. Durch Sauerstoffaufnahme bilden sich darin Glyceride der Oxylinolsäuren. Der Mischung von Kopalen und Leinölen setzt man noch Tepentinöl zu und gegebenenfalls ein sog. Trockenmittel. Letzteres beruht auf der katalytischen Wirkung einer Anzahl Metallverbindungen, die Oxydation des vegetabilen Öles zu beschleunigen. So sind Verbindungen von Mangan, wie leinölsaures und harzsaures Mangan, sehr geschätzt. Terpentinöl ist ein ätherisches Öl, welches sich trotz seines hohen Siedepunktes sehr leicht verflüchtigt. Der Flammpunkt liegt bei 30°—32° C. Seine Anwendung bei der Fabrikation von Lacken ist vor allem darin begründet, daß es gierig Sauerstoff aus der Luft aufnimmt und so die Trocknung der Lacke im Innern beschleunigt. Die sog. Terpentinölersatzstoffe besitzen diese Eigenschaften nicht, sie können die Lackerhärtung nur durch ihre Verdunstung fördern.

Der Verarbeitung von Kopalen ist eine Konkurrenz entstanden durch die Verwendung von öllöslichen Kunstharzen der Phenolaldehydgruppe, welche unter dem Namen „Albertole“ im Handel sind.

2. Die Erhärtung der eben aufgeführten Lacke geht also durch Abwicklung eines chemischen Prozesses vor sich. Dies ist aber nicht

der Fall bei Lacken, welche mit Spiritus, Benzol u. dgl. angesetzt werden. Hier verdunstet das Lösungsmittel, die Schicht aus Kolophonium, Asphalten u. a. setzt sich als harter, meist spröder Rückstand ab.

3) Bei der Lackierung mit elektrisch isolierenden Lacken wendet man mit Vorliebe für die Trocknung Wärmeöfen an, welche sich luft-leer machen lassen. Auf diese Weise sucht man die letzten Reste an Lösungsmitteln heraus zu holen, der Erhärtungsprozeß wird erheblich gefördert. Nicht bis zu Ende oxydierte Leinöllacke enthalten Stoffe, welche dissoziierbar sind und daher den elektrischen Strom leiten. Es sind deshalb diejenigen Öllacke besonders sorgfältig der Behandlung mit Luftsauerstoff zu unterziehen, welche einen hohen Prozentsatz von dem stark sauren Leinölfirnis enthalten.

4. Überblickt man den Chemismus und die Einflüsse, welche vom elektrischen Feld ausgehen, so läßt sich erkennen, daß viele Möglichkeiten für eine Stromwanderung vorhanden sind. Erst dann, wenn sich keine freien Säuren und Basen geltend machen können und die Oxydation des Lackes ihr Ende erreicht hat, tritt die elektrische Festigkeit ein. Bedingung hierfür ist aber auch, daß die fertige Lackschicht überall an Stoffbeschaffenheit durchaus gleichmäßig ist. Die Erhärtung von Lacken, an welche von außen her Luftsauerstoff herantreten muß, vollzieht sich in den inneren Schichten erheblich langsamer. Bleiben hier Stellen, deren Oxydation nicht vollständig erreicht wurde, bestehen, ist der Lack elektrisch schlecht. Da die Reaktionen der schwer molekularen organischen Körper langsam verlaufen, brauchen sie selbst bei gleichzeitiger Erwärmung viel Zeit. Wird das Verdünnungsmittel aus der Lackierung herausgezogen, hat man dabei vorsichtig zu verfahren, um keine Konzentrationsverschiebungen hervorzurufen. Überheizte Lacke zersetzen sich natürlich, von ihnen ist keine elektrische Isolierfähigkeit zu erwarten. Schätzenswerte Eigenschaften, wie gute Streichfähigkeit und Elastizität sowie Unangreifbarkeit durch heiße Mineralöle, wie solche in Transformatoren verwendet werden, können durch einen starken Leinölnzusatz erreicht werden. Feuchtigkeit darf auch nicht im Lack bleiben. Dabei ist zu berücksichtigen, daß Verdünnungsmittel, vor allem Alkohol, gern Wasser aus der Luft annehmen.

5. Einen Universallack, der allen Anforderungen der elektrischen Praxis entspricht, gibt es nicht, man hat daher jeweilig eine Auswahl zu treffen. In Betracht kommen als Lösungs- und Verdünnungsmittel Äthyl- und Methylalkohol (Holzgeist), Benzin, Benzol, Leinöl, Mohnöl, Nußöl, Hanföl, Rizinusöl, Holzöl und andere trocknende vegetabile Öle, Äther, Terpentinöl, Terpentinölersatz, Azeton, Schwefelkohlenstoff, Tetrachlorkohlenstoff, Chlorhydrine und zahllose andere Lösungen. Außer den genannten Kopalen verarbeitet man auch andere fossile und rezente Harze, wie Dammar, Bernstein, Schellack, Kolophonium, ferner natürliche und künstliche Asphalte, Paraffine, Kautschuk, Guttapercha, Wachs, Nitrozellulose u. a. Dann kommen weiterhin Azetylzellulosen, Kondensationsprodukte von Phenolen und Aldehyden, Kasein u. a. in Frage. Der Erhärtungsvorgang ist infolge der verschiedenartigen chemischen Konstitution sehr verschieden. Das ge-

nannte chinesische Holzöl wird jetzt in stark zunehmender Weise zur Anfertigung von Lacken verarbeitet. Während Leinöl auch in der Dunkelheit fest wird, ist dies bei Holzöl nicht der Fall. Dieses braucht zunächst die ultravioletten Strahlen, um sich dann zu polymerisieren bzw. oxydieren.

6. Wie sich die Wirkung des elektrischen Feldes auf die Lacklösung, den in Erhärtung begriffenen und den vollständig gleichmäßig gehärteten Lack vollzieht, wie Gase, Luft und Feuchtigkeitseinschlüsse, Elektrolyte, weiche Stellen, chemische Umbildungen usw. zur Verschlechterung des Nichtleiters beitragen, kann aus den Darstellungen der früheren Kapitel entnommen werden. Es erübrigt sich deshalb, nochmals zur Erklärung dieser Vorgänge sämtliche Register zu ziehen.

Lacke sind Nichtleiter in dünnen Schichten, sie haben beim Hartwerden den Vorteil der Nachgiebigkeit. Ist irgendwo unter Luftleere ein Hohlraum geblieben oder entstanden, so zieht sich die Masse gummiartig zusammen, die Oberfläche wird eingedrückt und der Hohlraum verschwindet. Dies ist bei Preßmassen und bei den durch Ofenbrennung gewonnenen mineralischen Isolierstoffen nicht der Fall. Es gelingt deshalb auch bei dünnen Lacken, Nichtleiter von sehr hoher spezifischer elektrischer Festigkeit herzustellen.

Baumwollspinnungen können sehr unter Lackierungen leiden, welche säurehaltig sind. Werden sie mit solchen Lacken, vor allem im Ofen, behandelt, pflegt oft schon nach kurzer Zeit Lack, Umspinnungen und Kupfer durch den elektrischen Strom zerstört zu werden.

Ofenlacke sind hinsichtlich ihrer elektrischen Festigkeit und ihrer Elastizität besser wie Luftlacke, sie haben aber diesen gegenüber den Nachteil, daß sie nicht so leicht in die Tiefen des Papierses oder der Umspinnungen eindringen. Diesem Umstande ist daher bei der Erhärtung Rechnung zu tragen, und durch passende Regulierung des Wärmeprozesses ist eine dielektrisch richtige und vollständige Umwandlung, auch der tiefsten Schichten, zu veranlassen. Nach erfolgter Entfeuchtung, Entgasung und Polymerisation kann die Zuendeführung des Erhärtungsprozesses in einer Atmosphäre von indifferenten Gasen vorgenommen werden, damit der Ionisierungspunkt, besonders bei Hochspannungsnichtleitern, so hoch wie möglich hinaufrückt.

7. Die eben zum Ausdruck gebrachten Gesichtspunkte kann man auch bei der Herstellung von Emailedrähthen berücksichtigen, also bei isolierten Drähthen, wo anstelle der Gespinnstummhüllung eine Lack-schicht tritt. Erreicht wird dadurch eine geringe Stärke der isolierenden Schicht und infolgedessen Raumersparnis am fertigen Apparat, ferner damit zusammenhängend ein verminderter Verbrauch an Leitungskupfer, weil die Spulen einen kleineren Durchmesser besitzen, und schließlich eine erhöhte Wärmebeständigkeit der Isolierung und Unempfindlichkeit gegenüber Feuchtigkeitseinflüssen.

Die Emaillierung der Drähthe nimmt man in der Weise vor, daß reiner blanker Kupferdraht durch eine Lacklösung hindurchgezogen wird. Der Draht wird dann durch einen heißen Raum geführt und das Lösungsmittel durch Verdunstung aus dem Lack entfernt. Der getrocknete

lackierte Draht geht dann noch mehrere Male durch die heiße Lacklösung, bis die gewünschte Dicke der isolierenden Hülle erreicht ist.

Dünne Emailledrähte werden vor ihrer Verwendung zweckmäßig auf elektrische Festigkeit geprüft. Bei Drahtstärken von mehr als 1 mm Durchmesser ist dies aber unnötig, weil sich hier infolge genügender Deckung keine Mängel bei der Lackierung einzustellen pflegen. Die Prüfung der dünnen Drähte von 0,025—1 mm kann in der Weise erfolgen, daß sie durch Quecksilber laufen, indem Fehlerhaftigkeiten durch Aufleuchten einer Glühlampe oder durch Registrierung durch ein Zählwerk festgestellt werden. Durch einen mitlaufenden Papierstreifen läßt sich auch die Lage der fehlerhaften Stellen ermitteln. Ein Lackdrahtprüfapparat von der C. Lorenz A.-G., welcher auch bei dem Telegraphentechnischen Reichsamte zur Prüfung der Postdrähte Eingang gefunden hat, vermeidet die Benutzung von Quecksilber, indem der Draht zwischen Walzen hindurchgezogen wird.

Die Verwendung von Emailledrähten nimmt immer größeren Umfang an, besonders bei der Herstellung von Apparaten für die Schwachstromtechnik. Schwachstromkabel, die sog. Lackpapierkabel, welche früher nur mit Baumwolle und Seide angefertigt wurden, bestehen aus Emailledraht und einer zusätzlichen Papierumwicklung.

8. Dem wertvollen Ausgangsmaterial für Hochspannungsisolatoren, Bakelite, war das 16. Kapitel vorbehalten. Es lassen sich aus diesen Phenolharzen auch elektrisch isolierende Lacke herstellen, welche fest an der Unterlage haften und erhebliche Belastungen vertragen, ehe Zerstörung erfolgt. Erst bei einem Druck von 900 kg, welche durch eine Stahlkugel von 10 cm Durchmesser auf ein mit Bakelitlacke beschichtetes Aluminiumblech übertragen wurden, zeigten sich bei einem Versuch Risse. Mit Ausnahme von konz. Schwefelsäure und konz. Salpetersäure wird Bakelitlack von sonstigen scharfen Reagenzien nicht angegriffen. Die elektrische Festigkeit der Überzüge auf Papier, Leinen und Seide ist bedeutend. Es genüge die Angabe, daß bei einer Papierstärke von 0,094 mm und zweimaliger Lackierung bei 11 Messungen und Anwendung von sinusförmigem Wechselstrom ein mittlerer Durchschlagswert von 10,9 kV gefunden wurde. Die Dielektrizitätskonstante der bakelitlackierten Papiere ergibt einen Mittelwert von 3,78. Notwendig ist die vollkommene Überführung von Bakelite A in die Form C. Zum Vergleich sei angeführt, daß die Verschiebbarkeit von synthetischem Schellack auf Papier 4,6, von Naturschellack 4,8 beträgt.

9. Vorschriften über die Eigenschaften der isolierenden Lacke gibt es schon in verschiedenen Ländern. Kürzlich sind von der British Electrical and Allied Industries Research Association Richtlinien für die Untersuchung elektrisch isolierender Lacke herausgekommen. Untersucht wird das spez. Gewicht, die Viskosität, der Entflammungspunkt, der Brennpunkt, das Trocknen auf einer ebenen Fläche, das Trocknen in einer Spule, die elektrische Festigkeit, der Widerstand gegen Feuchtigkeit, die Wasserundurchlässigkeit, das Altern, die Angriffe durch Säuren und Alkalien, die Angriffe durch Öl, die Angriffe des Lackes auf

Kupfer, die Wirkung der Glimmentladungen, die Angriffe durch Generatorgas und die Beständigkeit farbiger Lacke.

Für die Bestimmung des spez. Gewichtes sollen die Lacke Temperaturen von 15—25° C besitzen, das spez. Gewicht ist dann für eine Temperatur von 20° C festzulegen.

Die Viskosität hat in absoluten Einheiten für 20° C zu erfolgen.

Der Entflammungspunkt soll nach Abel¹⁾ oder Pensky-Martens²⁾ festgestellt werden.

Der Brennpunkt ist zu ermitteln, wie es die Amerikanische Gesellschaft für die Materialprüfungen A. S. T. M. Method D 92—21 T, Tentative Standards 1922, vorschreibt.

Das Trocknen an ebenen Flächen wird entweder auf Japanpapier oder auf Kupferflächen vorgenommen, welche ungefähr 8 Zoll lang und 6 Zoll breit sind. Sie werden in die Lacke getaucht, welche mit dem Verdünnungsmittel, das die liefernde Firma vorschreibt, versetzt sind. Sechs mit lufttrocknendem Lack hergestellte Proben werden bei einer Temperatur von 20—25° C getrocknet.

Sechs Proben werden in nicht verdünntem Lack 30 Minuten bei ungefähr 20° C belassen und dann im Ofen bei 95—100° C getrocknet, falls der Lackhersteller keine höhere Temperatur vorschreibt. Innerhalb 1 Stunde ist der Luftinhalt des Ofens dreimal zu wechseln. Nachdem die erste Schicht hart geworden ist, läßt man die Proben bei 20° C abkühlen und taucht sie ein zweites Mal in den Lack. Man hängt sie umgekehrt wie beim erstenmal zum Trocknen auf. Als trocken wird der Lack angesehen, wenn unter einer Belastung von 1 Pfund nach 1 Minute bei einer Temperatur von 15—25° C ein Whatman Filter von 1³/₄ Zoll Durchmesser nicht am Lack haftet.

Um das Trockenwerden des Lackes in einer Spule festzustellen, werden Spulen von 2 Zoll Durchmesser und 2 Zoll Länge benutzt, die mit Draht von 0,036 Zoll Durchmesser und doppelter Baumwollumspinnung versehen sind. Die Windungstiefe soll ungefähr 1/2 Zoll sein. Ein Teil der Proben wird im heißen Vakuumofen getrocknet und sofort 10 Minuten lang in einen Lack getaucht von einer Dicke, welche der Lackfabrikant vorschreibt. Nach dem Trocknen werden die Spulen bei verschiedenen Temperaturen und verschieden langen Zeiten erwärmt, indem man sich dabei auf die Vorschrift der Lieferanten stützt. Nach der Abkühlung wird festgestellt, wie die Härtung der Lagen vor sich gegangen und wie die Verbindung zwischen der Baumwolle, dem Lack und dem Kupferdraht ausgefallen ist.

Die Prüfung der elektrischen Festigkeit wird an lackierten Japanpapieren oder an lackierten Kupferplatten ausgeführt bei einer Temperatur von 20—25° C, ferner innerhalb 24 Stunden nach Trocknung des Lackes bei einer Temperatur von 90—95° C. Die Spannung soll mit ungefähr 250 V/min ansteigen, im übrigen werden die Bestimmungen für die Prüfung der elektrischen Festigkeit von festen Nichtleitern des

¹⁾ Holde, Untersuchung der Kohlenwasserstofföle und Fette S. 198. Berlin, Julius Springer 1918.

²⁾ Dortselbst S. 57.

Technical Publication L/S 2 zugrunde gelegt. Der Durchschlagswert, die Dicke der Probe, sowie die reine Lackdicke werden für jede Temperatur ermittelt.

Die Widerstandsfähigkeit gegenüber feuchten Einflüssen wird durch die Messung der elektrischen Durchschlagsfestigkeit ermittelt, nachdem die Probe drei Tage lang in einem Raum von mindestens 95 vH relativer Feuchtigkeit gelagert war.

Die Wasserdurchdringung ist ebenfalls elektrisch zu untersuchen. Auf der lackierten Kupferplatte wird ein Wachsring von 2 $\frac{1}{2}$ Zoll Durchmesser und $\frac{1}{8}$ Zoll Tiefe auf dem Lack angebracht, das Innere mit destilliertem Wasser gefüllt und 24 Stunden stehen gelassen. Dann wird das Wasser aufgesaugt und der Boden mit Fließpapier getrocknet. Im Wachsring werden Elektroden angebracht, ebenso außerhalb, wo kein Wasser gestanden hatte. Die Durchschlagswerte der Lackschicht unter dem Wasser und der nicht mit Wasser in Berührung gekommenen Orte werden verglichen.

Der Vorgang des Alterns wird so verfoht, daß lackierte Japanpapiere in einem Ofen bei 100—105° C getrocknet werden, und zwar 50, 100, 200, 300, 400 und 500 Stunden lang. Nach dem Erkalten ist bei 20° C die mechanische Festigkeit auf der Maschine zu ermitteln.

Die Prüfungen auf Säuren und Alkalität sind sehr umständlich und werden bei uns kaum in dieser Weise in Frage kommen, sie sollen deshalb nicht aufgeführt werden, da sie zweifellos einfacher möglich sind.

Für die Bestimmung, wie Lacke von Ölen angegriffen werden, legt man lackierte Papierproben in Öl von 115—120° C und prüft auf Schlamm bildung. Auch fertige lackierte Baumwollumspinnungen werden auf diese Weise untersucht.

Angriffe des Lacks durch Kupfer, Glimmentladungen und Generatorgas sind noch nicht hinreichend aufgeklärt, um Prüfmethode n vorzuschlagen zu können.

10. Deutscherseits ist man jetzt auch damit beschäftigt, Lieferungsbedingungen für Isolierlacke auszuarbeiten, und zwar ist ein Unterausschuß im Zentralverband der Deutschen Elektrotechnischen Industrie seit 1921 damit beschäftigt. Der Kommission für Isolierstoffe wurde hierüber berichtet.

An den vorliegenden Arbeiten nahmen nicht nur Verbraucher von Lacken, sondern auch die Fabrikanten teil. Aus diesen Kreisen kam der Vorschlag, als Lackträger nicht die in der Wärme leicht zersetzliche Zellulose in Form von Papier und Baumwolle zu verwenden, sondern Lackfilme herzustellen, an denen die Prüfungen vorzunehmen sind. Mit dieser Aufgabe wurde das Staatliche Materialprüfungsamt in Dahlem betraut, welches zunächst gelbe ofentrocknende Lacke in den Bereich seiner Untersuchungen zog.

An und für sich ist ein Vorteil eines guten Lackes, daß er fest an seiner Unterlage haftet. Dieser Umstand erschwerte zunächst die Herstellung der Lackfilme sehr. Aber man erreichte dann auf folgende Weise gute Ergebnisse. Eine eiserne Platte wurde als Grundlage benutzt und auf ihr ein angefeuchtetes Papier mit Hilfe eines Rahmens

straff gespannt. Das Papier war mehrmals mit einer 4 vH warmen Lösung von Gelatine in Wasser bestrichen und dann bei 60° C getrocknet worden. Dann ist der zu prüfende Lack unter Verwendung eines Streichmessers auf das Papier gleichmäßig aufgetragen und in einem elektrischen Ofen bei durchströmender Luft in genau wagerechter Lage getrocknet. Bei sämtlichen Lacken wurde darauf hin gearbeitet, sie in gleicher Stärke zu erhalten. Aber ihre Besonderheiten und ihr Gehalt an Lösungsmitteln ergaben Filmdicken, welche ziemlich verschieden sind und zwischen 40 und 120 μ ($\mu = \frac{1}{1000}$ mm) liegen. Getrocknet wurde zwischen 90° und 100° C. In 50° C warmem Wasser wurde der Film von dem Gelatinepapier getrennt. Wurden Lacke untersucht, welche wenig dehnbar sind, kann man durch Aufgießen auf talkumbestrebte Glasplatten Filme aus ihnen erhalten. Das Abziehen vom Glas gelingt aber nicht bei Filmen von großer Dehnbarkeit, der Einheitlichkeit halber wurde deshalb stets die Gelatinepapierunterlage benutzt.

Das Materialprüfungsamt ist mit den vorhandenen Filmen deshalb noch nicht ganz zufrieden, weil das Papier quillt und dadurch ungleich starke Filme hervorruft. Es sollen deshalb mit glattsatinierten gelatinierten Papieren weitere Versuche angestellt werden.

Weiter liegt das Bestreben vor, nicht nur Filme aus Lack herzustellen, sondern auch Rundstäbe. Es würde auch möglich sein, den Lack auf Zinnfolie zu gießen und trocknen zu lassen, um später das Zinn mit Quecksilber aufzunehmen. Diese Methode liefert völlig glatte Filme, ist aber für Betriebszwecke zu kostspielig.

Zunächst wurden mit den Filmen Zugversuche vorgenommen, um die Reißlast und die Reißdehnung zu ermitteln. Eingespannt wurden Streifen von 15 mm Breite und 80 mm Länge, welche eine Prüflänge von 50 mm gestatten.

Die Messungen wurden gleich nach der Anfertigung des Films vorgenommen, aber auch bei Lagerung in normaler Temperatur nach 1, 2, 10, 20, 60 und 120 Tagen nach der Herstellung, ferner nach 1, 2, 7 und 14 tägiger Lagerung bei 90—100° C. Die Versuchsergebnisse an 15 Lacksorten sind graphisch aufgenommen und in der ETZ 1925 S. 396 veröffentlicht. Es ergibt sich, daß die Lacke in ihrem Verhalten starke Unterschiede zeigen, daß aber diejenigen als die besten angesehen werden können, welche am dehnbarsten sind, und zwar sowohl bei normaler wie bei erhöhter Temperatur.

Wird der Lack spröde, steigt die mechanische Festigkeit. Eine gesetzmäßige Beziehung zwischen Reißfestigkeit und Reißdehnung ließ sich nicht feststellen. Das Zahlenmaterial gibt völlig unregelmäßige Werte.

Um die Lackfilme auf ihre mechanisch-technologischen Eigenschaften zu prüfen, wurden zur Bestimmung der Stoßelastizität Kugelfallproben vorgenommen. Außerdem fanden Kugeldruckproben statt, um einigermaßen ein Bild über den Widerstand zu erhalten, welchen die Lackschicht der Druckbelastung entgegensetzt.

Für die Kugelfallproben wurden Filmstreifen von 15 mm Breite und 50 mm Länge, die 60 Tage alt waren, auf einer ebenen Metall-

platte mit Holzklammern festgeklemmt. In ihrer Mitte besitzt die Auflageplatte eine kreisförmige Öffnung von 15 mm Durchmesser, der darüber befindliche Film liegt also frei in der Luft. Läßt man aus 170 mm Höhe eine Stahlkugel von 2,5 mm Durchmesser fallen, so fliegt die Kugel wieder zurück. Diesen Betrag mißt man und stellt ihn in Vergleich zur Fallhöhe, welche als Einheit betrachtet wurde. Es scheint, als ob die Reißfestigkeiten in Abhängigkeit von diesen Werten stehen. Aber das Untersuchungsmaterial langt noch nicht aus, um hier bestimmte Schlüsse auszusprechen.

Für die Kugeldruckprobe wurde eine mit 10 kg belastete Stahlkugel von 2,5 mm Durchmesser auf die Filmsubstanz gedrückt. Unterschiede, ob der Film 120 Tage bei normaler Temperatur oder 14 Tage bei 90—100° C gelagert hatte, konnten nicht beobachtet werden. Dagegen stellt sich heraus, daß teilweise die Eindruckstelle strahlenförmige Risse zeigt, in anderen Fällen aber glatt geblieben ist. Sichere Erklärungen, wie diese Erscheinungen mit den Materialeigenschaften zusammenhängen, sind hier auch nicht möglich, da einstweilen zu wenig Messungen angestellt wurden.

Die Untersuchungen werden fortgesetzt. Ferner sollen die Beziehungen zwischen Viskosität und Kapillarität geprüft werden, ebenso die Ölbeständigkeit und die Widerstandsfähigkeit gegen Feuchtigkeit, Säuren und Alkalien. Die Zähflüssigkeit nach Engler zu messen ist deshalb nicht angängig, weil die Flüchtigkeit der Lösungsmittel keine genauen Werte zuläßt.

Dagegen erscheint die Feststellung der Oberflächenspannung nach der Methode von Wilhelmy¹⁾ brauchbar.

Leider mußte zunächst die Bestimmung der Eindringtiefen des flüssigen Lackes unterbleiben, da das Prüfmateriale ausgegangen war.

Die Kommission zur Ausarbeitung von Prüfvorschriften ist aber inzwischen weiter tätig, um sowohl die mechanisch-technologischen als auch die elektrischen Untersuchungen zu Ende zu führen.

11. Zweckmäßig ist, daß der Fabrikant elektrisch isolierender Lacke die Prüfung seiner Lacke nicht nur von den Ämtern vornehmen läßt, sondern dies auch laufend selbst tut. Bei der Beobachtung erhält er wichtige Fingerzeige, wie eine Verbesserung seines Lackes durch Unterbindung der elektrolytischen und elektroosmotischen Erscheinungen stattfinden kann.

XIX. Elektrische Ausgußmassen.

Je mehr die Verlegung von Hochspannungskabeln fortschreitet, um so wichtiger werden die Vergußmassen, in welchen die Kabelend- und Abzweigarmaturen gelagert sind.

1. Verschiedene Angaben hierüber wurden schon im XV. Kapitel über diese Massen gemacht. Für eine Beurteilung des Verhaltens die-

¹⁾ Kohlrausch, Lehrbuch der praktischen Physik, 1921, S. 242.

ser Stoffe unter hohem Potentialgefälle hat man sich ihre chemische Zusammensetzung vor Augen zu führen. Besonders nach dem Schmelzen und dem erfolgten Übergang in den festgewordenen Zustand ist die Masse nicht einheitlich, weil die Bestandteile verschieden flüchtig sind und verschiedene Stockpunkte besitzen. Infolgedessen treten Konzentrationsänderungen, Lösungs- und Kristallisationserscheinungen auf. Diese Ungleichmäßigkeiten im Stoff können bei den Ausgußmassen teils stark hervortreten, teils gering sein.

Im elektrischen Felde machen sich die Inhomogenitäten mit Anwachsen des Spannungsgradienten immer stärker bemerkbar. Es scheiden sich die nichtleitenden Bestandteile und Einschlüsse mit verschiedenen Dielektrizitätskonstanten, Leitfähigkeiten und elektrischen Festigkeiten hintereinander, so daß die Spannungsbelastung pro Zentimeter ungleichmäßig wird und chemische Zersetzungen, d. h. Stromwanderungen, eintreten.

Bei gewöhnlicher Temperatur, bei kurzer Einwirkung des elektrischen Feldes und nicht zu hoher spezifischer Belastung durch dasselbe ergeben sich hohe Durchschlagsfestigkeiten bei einer Entfernung der Elektroden von 2—3 mm. Eine derartige Verwendung der Ausgußmassen findet in der Praxis meistens nicht statt, sondern die spannungsführenden Teile liegen erheblich weiter auseinander. Die Möglichkeit von Lagerungen fehlerhafter inhomogener Stoffteile zwischen den Leitern ist dann viel größer.

2. Eine wesentliche Rolle bei den Ausgußmassen spielt der Schwund, welcher mit der Temperatur zunimmt und erhebliche Werte betragen kann. So macht dieser bei Paraffin und einer Temperatursteigerung von 20° auf 60° C über 10 vH aus. Werden dickflüssige Stoffe den dünnflüssigen zugesetzt, so erhöht sich der Schwund der Mischung. Schmelzt man ein zweites Mal, so kann man im allgemeinen feststellen, daß der Prozentsatz des Schwindens wieder größer geworden ist, was auf den Gehalt an flüchtigen Bestandteilen Schlüsse zuläßt.

U. Retzow hat in EUM 1923, Heft 7, geprüft, wie kolophoniumhaltiges Öl zwischen 20° und 110° C schwindet:

Gehalt an Öl vH:	0	10	30	50	70	100
Schwund vH:	8,4	3,9	3,0	2,7	2,1	1,2

Auch die dielektrischen Verluste steigen infolge der ungleichmäßigen Zusammensetzung steil an.

3. Dringend notwendig ist es, die Ausgußmassen einer chemischen Analyse zu unterziehen. Wir haben große Gruppen von schmelzbaren isolierenden Körpern, welche hier in Betracht kommen können, wie fossile und rezente Harze, künstliche und natürliche Asphalte und sonstige Kohlenwasserstoffe. Elektrisch sind die fossilen Asphalte gut. Aber ihre Schmelzpunkte liegen teilweise so hoch, daß dies mechanisch schädlich ist. Von den Destillaten sind jetzt die höher molekularen Petrolpeche beachtenswert, welche sich durch einen geringen Bestandteil an koksartigen Produkten auszeichnen. Ausgußmassen müssen frei sein von Säuren, Alkalien und Schwefel. Sie sollen flüssig wie fest tun-

lichst dieselbe gleichmäßige Beschaffenheit und keinen zu großen Schwund besitzen, sie dürfen weder Feuchtigkeit noch Luft, die dielektrisch schädlichsten Stoffe, einschließen.

4. Nach Untersuchungen von H. W. L. Brückman-Delft ist eine Mischung von natürlichem Asphalt und Petrolpech zum Ausgießen von Kabelmuffeln geeignet.

Die Holländer haben sich auch schon mit der Normalisierung der Ausgußmassen beschäftigt. Um die Sprödigkeit festzustellen, gießen sie die Massen auf ein Blech. Wenn es gebogen wird, darf das Compound nicht abspringen.

Die Masse soll in der Wärme dünnflüssig sein und beim Erstarren nicht spröde oder rissig werden.

Der Erweichungspunkt wird nach Krämer-Sarnow¹⁾ und die Viskosität nach Engler bestimmt. Im ersten Falle hat man eine Grenztemperatur von 40° C für richtig erachtet, im zweiten Falle soll die Ausgußmasse bei 150° C durch eine 5 mm Ausflußöffnung höchstens 100 cm³ in 175 Sek. durchlassen.

Das Schwindmaß wird durch Ausfüllung der Schwindräume mit Quecksilber ermittelt. Zwischen 15°—150° C darf sich das Compound nicht mehr wie 5—10 vH eingengt haben.

Nach fünfstündiger Erwärmung auf 200° C sind die Verdampfverluste zu messen.

Die Durchschlagsfestigkeit hat 150 kV/cm zu betragen, eine Forderung, welche meistens leicht zu erfüllen ist.

5. Einen besonders für die Messung der dielektrischen Festigkeit von Ausgußmassen geeigneten Prüfapparat schlägt in ETZ 1924, S. 513 R. Dieterle vor, er benutzt als Elektroden eine Kugel von 25 mm Radius und stellt sie einer Kugelschale von 27 mm innerem Radius gegenüber. Da das Vergießen Mängel mit sich bringt, schlägt er vor, daß die Entfernung der Elektroden nicht unter 2 mm beträgt. Das Gefäß zur Aufnahme der Prüfmasse ist vor dem Eingießen anzuwärmen, damit die an den Wänden kondensierte Feuchtigkeit vorher vertrieben wird.

6. Von deutscher Seite arbeitet schon seit längerer Zeit eine Unterkommission des VDE Prüfvorschriften für Vergußmassen aus. Die Veröffentlichung des ersten Entwurfs wird noch in diesem Jahre erfolgen.

Hoffentlich sind recht genaue Angaben über die Feststellung der chemischen Zusammensetzung dieser Art elektrischer Nichtleiter darin enthalten.

¹⁾ Holde, 1918, S. 369. Diejenige Temperatur, bei welcher 5 g Hg über der Prüfmasse diese aus einem Röhrchen von 6—7 mm l. Durchmesser herausdrücken.

XX. Ein deutscher Entwurf zur Prüfung imprägnierter und nichtimprägnierter faseriger elektrischer Isolierstoffe.

Mit Prüfmethoden faseriger Isolierstoffe der Elektrotechnik hat man sich in den Kulturländern schon seit einiger Zeit befaßt.

Die Preßlinge, welche nach den früheren Ausführungen als isolierende Formstücke u. dgl. verarbeitet werden und meistens unter Anwendung von Druck entstehen, gehören auch zu den aus Fasern hergestellten Nichtleitern, weil sie ihre mechanischen Vorzüge durch die Fasern erhalten. Die Feststellung der Eigenschaften dieser Art von Körpern geschieht nach den Vorschriften, wie sie auf Seite 35 bis 47 angegeben sind.

Dagegen sollen im folgenden die Isolierstoffe in ihrer Form als Faser, Faden, Garn, Papier und Gewebe geprüft werden, und zwar im nichtimprägnierten wie im imprägnierten Zustand. Die zuerst genannte Untersuchung nimmt man meistens deshalb vor, um sich über die Güte der Rohstoffe zu orientieren, die Prüfung im imprägnierten Zustand ist für die praktische Verarbeitung als elektrischer Nichtleiter ausschlaggebend.

Vom VDE liegt ein in der ETZ 1925, S. 204 veröffentlichter Entwurf der Kommission für Isolierstoffe vor, welcher zunächst die Prüfung der mechanisch-technologischen Eigenschaften vorsieht. Die Richtlinien für die Untersuchung der elektrischen Eigenschaften sind noch nicht bekanntgegeben. Sie sollen sich an die auf Seite 38 abgedruckten Bestimmungen anlegen und bedürfen nur einer sinngemäßen Ergänzung.

Entwurf.

Prüfung nichtimprägnierter und imprägnierter faseriger elektrischer Isolierstoffe.

Faserige Isolierstoffe sind: Zellstoff, Papier, Baumwolle, Ramie, Jute, Hanf, Leinen, Seide, Tussahseide und Kunstseide.

Mechanisch-technologische Prüfung.

I. Die Prüfung erfolgt a) im ersten Verarbeitungszustand als Garn oder Zwirn, bei Papier im Bogen; b) im zweiten Verarbeitungszustand als Gewebe, bei Papier als Garn oder Band.

Die Prüfung erfolgt in gleicher Weise im natürlichen Zustand wie nach der Imprägnierung mit isolierenden Mitteln.

II. Die mechanisch-technologische Prüfung besteht aus folgenden Bestimmungen:

1. Bruchfestigkeit und Reißlänge,
2. Bruchdehnung,
3. Ungleichmäßigkeit des Materials in Beziehung auf 1 und 2,
4. Wärmefestigkeit,
5. Empfindlichkeit gegen Wasser,
6. Empfindlichkeit gegen Öl,
7. Prüfung auf Gehalt an Säuren und Alkalien.

III. Die Prüfung erfolgt nach den im Abschnitt IV—VII festgesetzten Methoden.

IV: Die Bruchfestigkeit wird mit dem Schopperschen Zerreißapparat bestimmt. Die freie Einspannlänge beträgt für Papier 18 cm bei einer Breite des Streifens von 1,5 cm. Für Garne und Gewebe beträgt die

freie Einspannlänge 10 cm, ebenso für Bänder. Bänder werden immer in der ganzen Breite eingespannt. Bei breiten Geweben ist die Streifenbreite 2 cm. Es ist dabei zu beachten, daß das Gewebe fadengerade geschnitten bzw. ausgefranst ist.

Die Bruchdehnung wird ebenfalls mit dem Schopperschen Apparat festgestellt. Sie ist in Prozenten anzugeben.

Die Werte der Bruchfestigkeit und Bruchdehnung werden bei Garnen und Bändern aus 10 Einzelwerten, bei Papieren und breiten Geweben aus 5 in der Längs- und 5 in der Querrichtung gemessenen Werten als Mittelwerte berechnet.

Aus der Differenz des Mittelwertes und des Untermittelwertes (Mittel aus den unter dem Gesamtmittel liegenden Werten) ergibt sich die Ungleichmäßigkeit des Materials; vervielfältigt mit 100 in Prozenten des Mittelwertes.

Die Reißlänge berechnet man nach der Formel: $R = P \cdot N$. Hierbei bedeutet R die Reißlänge in km, P die Bruchdehnung in kg und N die metrische Feinheitnummer (die metrische Feinheitnummer gibt die Anzahl Kilometer an, die auf 1 kg gehen). Der Wert für die metrische Nummer läßt sich bei Papier und Gewebe aus dem Quadratmeter-Gramm-Gewicht G ermitteln (z. B. $N = \frac{50}{G}$ für 2 cm breite Streifen und $N = \frac{200}{3 \cdot G}$ für 1,5 cm breite Streifen).

V. Die Wärmefestigkeit wird bestimmt, indem Proben des Materials 6 Stunden Temperaturen von 70° C, 90°, 110° und 130° ausgesetzt werden, und die Bruchfestigkeit, wie oben, ermittelt wird. Die Wärmefestigkeit bei den vorher angegebenen Temperaturen wird ausgedrückt in Prozenten, bezogen auf die ohne Wärmewirkung erhaltenen Werte.

VI. Bestimmung des Verhaltens gegen Wasser. Das Material wird 24 Stunden im Wasser gelagert und die Veränderung der Bruchfestigkeit und Bruchdehnung in Prozenten festgestellt. Die Wasseraufnahme ist in Prozenten anzugeben. Sie wird bestimmt, indem man das lufttrocken gewogene Material 24 Stunden in Wasser einlegt, herausnimmt, 10 min frei hängen läßt und dann wägt.

VII. Bestimmung des Verhaltens in Öl. Das Material wird 24 Stunden in Öl bei Zimmertemperatur gelagert und die Veränderung der Bruchfestigkeit und Bruchdehnung in Prozenten festgestellt. Das Verhalten in Öl bei Temperaturen von 70°, 90°, 110° und 130° C wird in gleicher Weise ermittelt.

Materialien, die bei Zimmertemperatur oder unter Erwärmung unter Öl dem elektrischen Feld ausgesetzt sind, werden geprüft, indem ihre Bruchfestigkeit und Bruchdehnung mit den Anfangswerten verglichen werden. Die Materialien werden \quad Stunden dem elektrischen Feld ausgesetzt.

Der vorstehende Entwurf hat erfreulicherweise erhebliche Beachtung gefunden. Außer anderen Fachleuten und dem Verfasser nehmen auch staatliche Ämter und industrielle Unternehmungen dazu Stellung. Es sind eine ganze Reihe bemerkenswerter Vorschläge über eine zweckmäßige Abänderung und Vervollständigung des Entwurfes gemacht, die nachstehend wiedergegeben und zur Aussprache gestellt werden.

1. So wird darauf hingewiesen, daß vorteilhaft für die unter IV vorgesehene Bezeichnung der Reißlänge noch bei II die Gewichtsbestimmung für die Längeneinheiten bei Garnen und Bändern und für die Flächeneinheit bei Geweben eingefügt wird. Ferner soll man in den Richtlinien überall „Zugfestigkeit“ statt „Bruchfestigkeit“ schreiben.

2. Notwendig erscheint, darauf aufmerksam zu machen, daß die Prüfungen, um Vergleichswerte zu erhalten, stets bei bestimmter Luft-

feuchtigkeit, z. B. bei 65 vH, auszuführen sind und daß die Materialien vor der Prüfung mehrere Stunden in einem Raum mit dieser Feuchtigkeit lagern.

3. Die freie Einspannlänge von 10 cm für Gespinnste ist zu klein, besonders für Bastfasern. Wenigstens 20 cm sind vorzuschreiben. Dasselbe gilt für Gewebe. Für diese dürfte mit Rücksicht auf deren Ungleichmäßigkeit auch eine Streifenbreite von 3 cm zweckmäßiger sein als eine solche von 2 cm. Die Streifen sind fadengerade und 1 cm breiter zu schneiden und die Längsfäden an jeder Streifenbreite auf 5 mm Breite auszufransen, um das Heraustreten der Randfäden beim Zugversuch zu vermeiden bzw. zu erschweren.

4. Zur Ermittlung der Ungleichmäßigkeit von Garnen reichen 10 Einzelversuche bei weitem nicht aus, 20 sind mindestens vorzunehmen.

5. Die Ungleichmäßigkeit wird besser ausgedrückt durch die mittlere Abweichung des Einzelversuchs vom Mittel. Wie wenig geeignet der „Untermittelwert“ ist, dafür dient das nachstehende Beispiel:

11		11,2
11		11,1
11		11,1
11		11,1
10		9,9 9,9
10		9,9 9,9
10		9,9 9,9
10		9,9 9,9
10		9,9 9,9
6 6		6,0 6,0
10,0 6 : 1 = 6,0		10,0 55,5 : 6 = 9,25
10,0 - 6,0 = 4,0		10,0 - 9,25 = 0,75
4,0 : 10,0 = 40 vH		0,75 : 10 = 7,5 vH

Die beiden praktisch gleichwertigen Versuchsreihen haben eine „Ungleichmäßigkeit“ einmal von 40 vH, das andere Mal von 7,5 vH. Da die Summe der Fehlerquadrate für die Berechnung umständlich wäre, ist der beste Streuungsmaßstab die Abweichung des Größt- und Kleinstwertes vom Mittelwert. Die Berechnung kann unter Zuhilfenahme des in der Praxis noch vielfach benutzten Maßstabes „Mittel minus Untermittel“ erfolgen, wenn gleichzeitig das Verhältnis der Zahl der Untermittelwerte zur Gesamtversuchszahl berücksichtigt wird. Der entsprechende Ansatz ist: Ungleichmäßigkeit in Prozenten des Mittels = $\frac{(\text{Mittel minus Untermittel}) \cdot 100 \cdot 2 \cdot n}{\text{Mittel} \cdot z}$, wo n die Zahl der unter dem Mittel liegenden Werte und z die Gesamtversuchszahl angibt.

6. Die Angabe der Reißlänge von Papier in Kilometern ist nicht handelsüblich. Sie erfolgt vielmehr seit Jahrzehnten nur noch in Metern und berechnet sich nach der Formel: $x = \frac{0,18}{G} \cdot p \cdot 1000$, worin x die Reißlänge in Metern, G das mittlere Gewicht der zerrissenen Streifen von 18 cm freier Einspannlänge in Gramm und p die mittlere Belastung der Streifen beim Bruch in Kilogramm bedeuten.

7. Unter V wäre noch anzugeben, ob das Material unmittelbar nach der Trocknung auf Zugfestigkeit geprüft werden soll oder erst, nachdem es sich durch mehrstündiges Lagern im Versuchsraum der normalen Feuchtigkeit wieder angepaßt hat. Im ersten Falle ist zu bedenken, daß sich der Zustand der Proben gleich nach deren Entnahme aus dem Trockenofen durch Feuchtigkeitsaufnahme schnell ändert.

8. Um die Prüfbestimmungen als Lieferungsvorschriften beim Bezug von faserigen Isolierstoffen nutzen zu können, erscheint die Angabe des Geltungsbereiches notwendig. Man könnte auch Zellulose, Flachs, Nesselfaser und Asbest unter den zu prüfenden Stoffen auführen.

9. Zweckmäßig sind noch Angaben über Dicke, Faserlänge, Garnnummer, Fadenzahl, sowie Flächengewicht, Höchstbelastung, Falzzahl und Feuchtigkeitsgehalt. Die mikroskopische und chemische Prüfung soll sich auch erstrecken auf die Faserart und die Beimengung. Für die Beurteilung der elektrischen Eigenschaften sind die Durchschlagsfestigkeit und das Verhalten im elektrischen Felde festzustellen. An geschichteten Isolierstoffen können Schäden durch dielektrische Verluste entstehen, wenn eine zu lange Zeit hindurch mit zu hoher Spannung geprüft wird.

10. Bei dem aus 10 Einzelwerten von Höchstbelastung, Reißlänge, Bruchdehnung, Falzzahl, Verhalten nach Erwärmung und elektrischer Durchschlagsfestigkeit gewonnenen Mittel sind noch der gefundene Größt- und Kleinstwert hinzuzufügen.

11. Beobachtet wird die Höchstbelastung in Kilogramm und die Bruchdehnung, welche das Verhältnis der Verlängerung zur Versuchslänge darstellt, in Hundertteilen. Aus der Höchstbelastung $= P$ und der metrischen Feinheitnummer $= Nm/g = km/kg$ bzw. aus dem Flächengewicht G in g/m^2 wird die Reißlänge R in km nach der Formel berechnet: $R = P \cdot N = P/G$. Die Werte längs und quer sind getrennt anzugeben.

12. Der Feuchtigkeitsgehalt ist im Konditionierapparat¹⁾ zu bestimmen.

13. Zur Kennzeichnung der Wasseraufnahme wird das Material 24 Stunden lang im Exsikkator mit Chlorkalziumbeigabe gelagert, gewogen, weitere 24 Stunden lang im Wasser gelagert, herausgenommen, während 10 Minuten frei hängen gelassen, wobei offen sichtbare Wasserpartikelchen abzunehmen sind und dann wiederum gewogen. Der Gewichtsunterschied im Verhältnis zum Trockengewicht wird als Wasseraufnahme angegeben.

14. Um den Einfluß des Wassers auf die Festigkeitseigenschaften festzustellen, werden die Proben 24 Stunden in Wasser gelagert und

¹⁾ Vorrichtung zur Bestimmung des Feuchtigkeitsgehalts durch vollständiges Austrocknen in Apparaten, welche mit einer Wage verbunden sind. Bei Seide erwärmt man auf 105° – 120° C, bei allen übrigen Stoffen auf 105° – 110° C. Die Austrocknung gilt als vollständig, wenn die Probe in den letzten 8 Minuten nach Angabe der mit dem Apparat verbundenen Wage nicht mehr als 0,05 vH an Gewicht verloren hat.

dann den Zugversuchen unterworfen. Die gegenüber der Höchstbelastung, Reißlänge und Bruchdehnung eingetretene Änderung wird im Verhältnis zu den ursprünglichen Mittelwerten angegeben.

15. Der Einfluß vom Mineralöl auf die Festigkeitseigenschaften wird in der Weise ermittelt, daß das Material 24 Stunden in Transformatoröl bei Zimmertemperatur gelagert und darauf dem Zugversuch unterworfen wird. Die gegenüber der Höchstbelastung, der Reißlänge und der Druckdehnung eingetretene Änderung wird im Verhältnis zu den ursprünglichen Mittelwerten angegeben. Die Lagerung kann auch bei 70°, 90°, 110° und 130° C durchgeführt werden.

16. Die Unterscheidung von Natron- und Sulfitzellulose durch eine mikroskopische Beobachtung ist besonders wichtig.

17. Die organischen und anorganischen Beimengungen, im letzteren Fall deren Aschen, sind festzustellen.

18. Die Prüfung auf Gehalt an Säuren und Alkalien wird an einem wässrigen Auszug des Materiales unter Benutzung von Phenolphthalein ausgeführt.

19. Zur Messung der elektrischen Durchschlagsfestigkeit wird unter einer Belastung von 1 kg zwischen Plattenelektroden von 5 cm Durchmesser und abgerundeten Kanten langsam ansteigende Wechselstromspannung angelegt, bis Durchschlag erfolgt. Bei nichtimprägniertem Material kann bis 440 V auch Gleichstromspannung verwendet werden. Die Durchschlagsfestigkeit wird als Mittelwert der effektiven Durchschlagsspannung aus 10 Durchschlägen in Volt für die betreffende Materialdicke angegeben.

20. Es empfiehlt sich, die vom NDI genormten Benennungen zu übernehmen, also (vgl. NDI 1602) Höchstbelastung statt Bruchfestigkeit und Versuchslänge statt Einspannlänge. Die Beschränkung auf die Firma Schopper ist für Zerreißmaschinen nicht begründet, dagegen für Falzmaschinen.

21. Der Ausdruck „Wärmefestigkeit“ erscheint nicht geeignet, den beabsichtigten Wert zu decken.

22. Die „Lufttrockenheit“ muß näher definiert werden.

23. Das Verhalten gegen Säuredämpfe ist zu prüfen, insbesondere kommt der Einfluß von Schwefelsäure in Frage. Bei besonderen Forderungen, wie z. B. Einrichtungen von Säurefabriken oder Fabriken, wo ätzende Gase wie Chlor- und Nitroverbindungen und andere starkwirkende Reagenzien auftreten, sind die Ermittlungen den jeweiligen Anforderungen gemäß durchzuführen. Man soll bei derartigen Untersuchungen stets den Einfluß der Zeit, der Temperatur und der Säurekonzentration berücksichtigen. Die Beobachtung hat sich zu erstrecken auf die äußere Veränderung, die Veränderung des Gewichtes in Prozenten, die Veränderung des Isolationswiderstandes und die Veränderung der Festigkeit.

24. Die Faser- oder Walzrichtung ist bei inhomogenem Material sorgfältig zu untersuchen. Die mikroskopische Beobachtung gibt darüber Aufschluß, in welchem Zustande sich die Fasern befinden und in welchen Mengen sie vorhanden sind, soweit sich letzteres durch Ab-

schätzung des mikroskopischen Bildes im Vergleich mit Mischungen von bekannter Zusammensetzung beurteilen läßt. Deshalb wird eine mikroskopische Untersuchung gefordert¹⁾.

25. Es ist auch die Seewasserbeständigkeit zu ermitteln. Obwohl es sich hier nur um spezielle Fälle handelt, wird diese Prüfung doch als notwendig angesehen und bezieht sich wieder auf die äußere Veränderung, die Veränderung des Gewichtes in Hundertteilen, die Veränderung des Isolationswiderstandes und die Veränderung der Festigkeit. Es kommen hier hauptsächlich die Isolationen für die Antennen der drahtlosen Telegraphie, ferner jegliche Isoliermaterialien in Frage, welche dem direkten Einfluß des Seewassers ausgesetzt sind. Man soll zwei verschiedene Konzentrationen von Seewasser anwenden, einprozentiges und dreiprozentiges, und den Einfluß der Zeit und der Temperatur berücksichtigen.

26. Die Frostbeständigkeit ist ebenfalls festzustellen. Die Anforderung an die Temperaturbeständigkeit sind bei dem Isoliermaterial außerordentlich groß, mag es sich um Schwachstrom-, Starkstrom-, Hochspannungs- oder Hochfrequenzapparate handeln. Die Prüfungen auf Frostbeständigkeit sollen das Verhalten der Materialien nach abwechselndem Einfrieren und Wiederauftauen feststellen. Hierbei müssen die äußeren Veränderungen beobachtet werden. Verdickungen, Schrumpfungen und Abblättern sind zu prüfen. Bei allen diesen Versuchen sind mikroskopische Lichtbilderaufnahmen erwünscht, um dauernd besonders interessante Vorkommnisse festzuhalten.

27. Die Untersuchung der Falzbiegefestigkeit kommt in Frage bei der Feststellung der mechanischen Güte von biegsamen Isolierstoffen wie Papierbändern, Leinen- und Seidenbändern, überhaupt der unlackierten und lackierten Stoffe, und zwar mit dem Schopperschen Apparat. Während des Untersuchungsvorganges wird die Probe bei jedem Gang des Schiebers zweimal in entgegengesetzter Richtung gefalzt. Die Zahl der bis zum Reißen ausgeübten Falzungen wird durch ein Zählwerk festgestellt, welches gleichzeitig den Antriebsstromkreis unterbricht, sobald die Probe zerstört ist. Die Falzzahlen sind Maßstäbe für den Gütegrad der Materialien.

28. Für die Prüfung von Asbestfaser ist die Aschebestimmung wichtig.

29. Der Abschnitt I des Entwurfes könnte den Eindruck erwecken, als ob jeder Isolierstoff in den verschiedenen Verarbeitungszuständen geprüft werden müßte, während die Unterteilung nur als eine Erläuterung zu der vorhergehenden Aufzählung aufzufassen ist. Es sind daher die Worte: „Die Prüfung erfolgt“ zweckmäßig wegzulassen und dafür zu setzen: „Die Isolierstoffe werden im allgemeinen nur in dem Verarbeitungszustand der Anlieferung untersucht.“

¹⁾ Nach Entfernung der Leimungs- und Füllstoffe mit 1prozentiger Natronlauge unter Erhitzung wird nach dem Auswaschen die Faser zu einem Brei geschüttelt und unter dem Mikroskop bei Benutzung von färbenden Reagentien optisch analysiert. Siehe auch Dr. Foulon, Die mikroskopische Bestimmung der Faserart in Papier. „Zellstoff und Papier“, 1925, Nr. 10, S. 397.

30. Empfohlen werden noch Feststellungen über die Empfindlichkeit nichtimprägnierter und imprägnierter Faserstoffe gegen Öllack und mageren Lack sowie gegen Glimmentladungen.

31. Die Untersuchungen über die Ungleichmäßigkeit des Materials sind außer auf die Festigkeitseigenschaften noch auf Aussehen und Dickenänderung auszudehnen.

32. Als Elektroden zur Messung der Durchschlagsfestigkeit werden kreisrunde ebene Kupferscheiben von 10 mm Durchmesser mit abgerundeten Kanten bei einem Krümmungsradius = 1 mm vorgeschlagen. Die Materialstärke an der durchschlagenen Stelle ist zweckmäßig so zu ermitteln, daß man die eine Elektrode wie eine Mikrometerschraube ausbildet.

Den Anregungen zu einer Verbesserung und Vervollständigung des Entwurfes ist im Vorstehenden hinreichend Raum gegeben, die Unterkommission für elektrische Faserstoffe wird sich eingehend mit diesen dankenswerten Vorschlägen befassen, sie nimmt auch gern weitere Stellungnahme dazu entgegen.

XXI. Ein ausländischer Entwurf von Lieferungsbedingungen beim Bezug von isolierenden Geweben.

Von französischer Seite ist vor einiger Zeit ein sehr beachtenswerter Entwurf veröffentlicht, welcher die Lieferungsbedingungen beim Bezug elektrisch isolierender Gewebe behandelt. Zugleich sind hierzu Erklärungen herausgekommen. Da es sich um Materialfragen handelt, von denen die Betriebssicherheit der elektrischen Anlagen in erheblichem Maße abhängt, sollen aus den umfangreichen Berichten einige Auszüge wiedergegeben werden.

1. Die französischen Arbeiten bemerken, daß die isolierenden Gewebe auch ungeübten Arbeitskräften zuzuführen sind und sie daher Widerstandsfähigkeit gegen Druck, Zug, Abscherung und Falzen besitzen müssen, ferner eine leichte Bearbeitung, auch beim Wickeln, ohne daß Löcher entstehen und Erwärmung Schäden verursachen kann.

2. Besitzt das Gewebe nicht genügend Nachgiebigkeit, entstehen luftgefüllte Räume. Bei Hochspannung liegt dann die Gefahr der Bildung von Ozon unter Oxydation benachbarter Isolationen vor. Bei den Transformatoren, welche in Öl liegen, wird ein Durchschlag herbeigeführt, wenn Lufteinschlüsse im Isoliermaterial zurückgeblieben sind. Es wird dadurch die Eigenschaft der Isolierung herabgedrückt. Die Gegenwart von Luft verringert auch die Abkühlung.

Die Eigenschaften der Gewebe werden im besonderen durch die elektrische Belastung beeinflußt, daher ist eine Prüfung wichtig.

3. Man vermeidet zwar, elektrische Maschinen feuchten Einwirkungen auszusetzen. Aber es läßt sich nicht verhindern, daß sich in Maschinen und Transformatoren Wasserdampf kondensiert. Daher ist es erforderlich, zu prüfen, ob die Gewebe und in welchem Maße sie aus

der Umgebung Feuchtigkeit aufnehmen können, und ob dadurch eine Gefahr für den praktischen Betrieb zu befürchten ist.

Vor Erwärmung lassen sich elektrische Maschinen und Apparate nicht schützen. Der Einfluß der Wärme auf die Nichtleiter ist daher festzustellen.

4. Luft kann in verschiedener Weise auf die elektrischen Baustoffe wirken, je nachdem, ob sie sich in natürlichem Zustand befindet oder durch elektrische Ausstrahlungen ozonisiert ist. Im letzten Fall besitzt sie dann eine starke oxydierende Kraft, welche die Gewebe in einen mechanisch minderwertigen Zustand versetzt und sie unfähig macht, die von ihnen erwarteten Eigenschaften zu bewahren. Die Zerstörungen sind bei steigenden Temperaturen noch erheblich größer.

5. Vom dielektrischen Standpunkte aus sollen solche Faserstoffe herausgesucht werden, welche einen großen Widerstand gegen Durchschlag oder Oberflächenleitung besitzen, einen großen Ohmschen Widerstand haben und eine kleine Dielektrizitätskonstante.

6. Bei Vornahme von Festigkeitsprüfungen beruht eine Hauptschwierigkeit in der Herstellung von Backen, welche das Gewebe gut zusammendrücken. Es darf keinen Schaden leiden und soll sich leicht in die Backen einlegen, damit nicht nur der Rand allein die Zugspannung aushält.

Diese Bedingungen erfüllt der von Bureau 1913 gebaute Apparat, welcher Backen mit wellenförmigen Oberflächen besitzt, bei denen die Wellenformen sich schachtelförmig eine in die andere einfügen. Ein reichliches Stück vor dem Austritt der Versuchsprobe aus den Backen ist glatt zu lassen. Zweckmäßig sind Backen aus Kautschuk oder Kupfer. Die Probe soll für den Zugversuch vorteilhaft 20 cm Einspannlänge aufweisen, 3 cm breit und parallel geschnitten sein im Sinne des Gewebes. Die Fäden haben von einem äußersten Ende bis zum anderen zu laufen. Wenn für gewisse Bänder die Breite geringer ist wie 3 cm, oder wenn man nicht in der Breite des Bandes schneiden will, soll das Ergebnis auf 3 cm umgerechnet werden. Aus dem Mittel von fünf Versuchen, auf Quadratcentimeter umgerechnet, soll das Ergebnis ermittelt werden.

7. Zugleich mit der Reißfestigkeit ist die Verlängerung der Probe beim Reißen zu ermitteln. Gegebenenfalls sollen auf der Probe zwei parallele Striche im Abstand von 20 cm im Sinne der Zugrichtung markiert werden. Man vergleicht nach dem Bruch die Punkte, welche benachbart waren und mißt die Zunahme der Entfernung. Diese Zunahme, auf 20 cm bezogen, bestimmt die Verlängerung des Versuchsgegenstandes. Man nimmt wieder das Mittel aus fünf Versuchen.

8. Auch ist ein elektrischer Durchschlagsversuch unter mechanischer Spannung vorzunehmen. Zum mindesten soll man diese Prüfung bei den imprägnierten Geweben anstellen, weil die Gewebe im allgemeinen im Betrieb auch gespannt sind. Zu diesem Zwecke belastet man die Probe als niedrigsten Wert mit 20 vH der gefundenen Reißfestig-

keit, drückt als Elektroden nachgiebige runde Blechscheiben mit elastischen Zwischenlagen gegen die Gewebeprobe und nimmt aus 10 Durchschlagsversuchen das Mittel. Man soll das Gewebe auch einem gleichmäßigen mechanischen Zug von 80 vH der Spannungsgrenze aussetzen und dabei wieder elektrisch prüfen. Die Erhöhung der Prüfspannung hat allmählich zu erfolgen, ungefähr 200 V/s. Man zeichnet dann eine Kurve der Durchschlagsspannung als Funktion der Druckbelastung auf.

9. Mit einigen Änderungen der Apparatur läßt sich auch der Widerstand gegen Abscherung messen. Beim Falzversuch ist ähnlich wie bei der Lackprüfung vorzugehen.

10. Zwischen nichtimprägnierten und imprägnierten Faserstoffen hat man hinsichtlich des Verhaltens gegen Feuchtigkeit einen Unterschied zu machen. Für die ersten ist die Fähigkeit, Wasser aufzusaugen, zu ermitteln. Imprägnierte Gewebe sind feuchtigkeitsbeständig herzustellen, daher ist dieser Umstand zu prüfen.

11. Für die Feststellung der Aufsaugefähigkeit wird vermieden, die Proben in der Wärme zu trocknen. Es ist besser, den Prüfkörper von 10 cm Länge und 10 cm Breite in einen Exsikkator zu legen. Nach der Wägung bringt man ihn einige Tage in einen feuchtigkeitsgesättigten Raum und wägt ihn dann wieder. Die Durchschlagfestigkeit von trockenem und feuchtem Gewebe ist zu vergleichen.

12. Für imprägnierte Gewebe kann man das Verfahren in derselben Weise anwenden, wie bei den Lacken, indem man Proben von 10 cm × 10 cm 8 Tage lang in feuchtigkeitsgesättigter Luft bei 20° oder in Wasser bei 20° liegen läßt. Dann nimmt man Durchschlagsversuche vor und vergleicht die anfängliche Durchschlagfestigkeit mit der nach 8 Tagen.

13. Die Einwirkung von Luft und Wärme auf nichtimprägnierte oder auf imprägnierte Faserstoffe ist eine sehr verschiedene. Reine Gewebe können bei Hitze gebrechlich werden und sogar verkohlen. Um dies zu prüfen, wickelt man eine Probe von 10 cm × 10 cm über eine Kupferstange von 50 cm Länge und legt darüber einen Schutz gegen direkte Berührung mit der Flamme. Mit Hilfe von Thermoelementen ist überall eine Temperaturbestimmung möglich. An den äußeren Enden ist die Kupferstange heizbar. Man kann auf diese Weise die Temperatur feststellen, wann das Sengen beginnt, ebenso die Entflammungstemperatur. Die gesuchte Temperatur ist diejenige, bei welcher nach dem Thermoelement das Gewebe zu rauchen beginnt.

14. Die Unterschiede der mechanischen Eigenschaften reiner Gewebe in der Wärme lernt man noch besser kennen, wenn man auch Bestimmungen der Reißlänge und der Längenausdehnung vornimmt.

15. Als zulässige Mindesttemperatur soll wenigstens die Höchsttemperatur gelten, welche in den elektrischen Maschinen, wo das betr. Gewebe benutzt wird, vorkommen kann.

16. Als angemessene Zeit für den Wärmeversuch werden 8 Tage in Vorschlag gebracht. Bei imprägnierten Stoffen kann man sich unter Umständen mit 1 oder 2 Tagen auch begnügen. Die Durchschlagswerte

in Abwesenheit von Luft scheinen um einen kleinen Betrag geringer zu sein, als wenn sie in Luft erhalten wurden.

17. Alle Gewebe nehmen im Laufe der Zeit durch die Luft an Festigkeit ab. Um sicher zum Ziele zu kommen, bedient man sich zur Vornahme dieser Alterungsprüfungen der Hilfe von Ozon. Innerhalb 5 Stunden, ohne eine Unterbrechung eintreten zu lassen, erhält man auf diese Weise das Ergebnis, welches der Wirkung von 1 Monat an ungünstigen atmosphärischen Bedingungen in kalter und feuchter Luft entspricht. Als Erzeuger der Glimmstrahlungen wird die Spitzenwirkung von ungefähr 1000 Nadeln mit 2700 V Spannung zwischen Elektroden von 10 cm Abstand nutzbar gemacht. Der von Boreau stammende Versuchsapparat ist beschrieben im Bulletin de la Société des Ingénieurs Eléctriciens III, S. 869. Die meisten Gewebe saugen Öl auf. Es hat sich gezeigt, daß nach 8 Tagen die Grenze erreicht ist. Bei Öl von 70° ist dies schon nach einigen Stunden der Fall. Trotzdem wird vorgeschlagen, an imprägnierten Geweben von 10 cm × 10 cm die Durchschlagsversuche nach achttägiger Lagerung in heißem Öl von 110° vorzunehmen, ebenso Zugversuche.

18. In Transformatorenölen findet bekanntermaßen eine Einwirkung auf nichtimprägnierte Baumwolle statt, indem die mechanischen Eigenschaften verschlechtert werden. Deshalb macht man zweckmäßig mit nichtimprägnierten und imprägnierten Geweben Zugversuche nach achttägigem Liegen in heißem Öl von 110°. Baumwolle erleidet eine Widerstandsverminderung von 15—20 vH.

19. Wichtig ist noch, festzustellen, wie Gewebe auf Körper wirken, mit denen sie in Berührung kommen, z. B. auf Kupfer. Man preßt nach Boreau eine Gewebeprobe von 10 cm × 10 cm zwischen zwei blankgeputzte feinpolierte Kupferplatten und erwärmt acht Tage lang auf 110°. Gewöhnlich stellt man dann das Auftreten von grünlichen Flecken fest. Durch einen Leitfähigkeitsversuch ist zu prüfen, ob der spez. Widerstand abgenommen hat.

20. Da die Gewebe meistens nicht chemisch neutral sind, ermittelt man den Säuregehalt durch den Angriff auf Kupfer. Ein bestimmtes Gewicht des Gewebes wird in feine Teilchen zerschnitten und 1 Stunde lang mit destilliertem Wasser gekocht. Durch Titration stellt man den Säuregehalt fest. Bei der Untersuchung auf anorganische Säuren kocht man das Gewebe mit wasserfreiem Benzin oder Alkohol, oder man läßt das Gewebe 8 Tage lang in einer Benzin-Alkoholmischung liegen.

21. Die Befähigung der Gewebe für die Imprägnierung soll nach der Kapillarmethode untersucht werden, wie sie bei den Lacken gebräuchlich ist. Gewebe, die mit Öl oder anderen Stoffen getränkt werden sollen, dürfen keinerlei Appretur haben.

22. Durchschlagsversuche sind in derselben Weise vorzunehmen, wie dies für Papiere und Lacke vorgeschrieben ist, und zwar nach einer halbständigen Trocknung bei 100°. Es sind zehn Feststellungen zu machen, aus deren Mittel man das Ergebnis der Versuche nimmt. Bei der Isolierung einer Maschine soll man sich daran erinnern, daß nur ein Material Wert hat, welches den Mindestanforderungen genügt. Die

Unterschiede zwischen den niedrigsten und den mittleren Durchschlagszahlen sollen aus praktischen Gründen nicht größer als 10 bis 20 vH sein. Es kann verlangt werden, daß das Gewebe für eine durch die Prüfung ermittelte Spannung dann auch dauernd hält. Um dies zu gewährleisten, hat der Durchschlag nicht vor Ende einer Zeit von 30 Min. zu erfolgen. Die genaue Zeit ist durch vergleichende Versuche zu bestimmen.

23. Für die Leitfähigkeitsuntersuchungen werden Elektroden aus zwei rechtwinkeligen Kupferplatten benutzt, die durch eine Hartgummi-Brücke zusammengehalten werden. In einer Entfernung von 1 cm werden sie planparallel aufgesetzt. Die Ränder sollen in Aufsicht 45° schräg sein, die unteren Kanten leicht abgestumpft. Die Winkel der Platten haben eine solche Brechung zu besitzen, daß ein namhafter elektrostatischer Druck vermieden wird. Die zweckmäßige Kantenlänge beträgt 5 cm.

24. Ohmscher Widerstand und spez. Leitfähigkeit sind mit der Wiener Brücke zu bestimmen, wenn man es überhaupt für nötig hält, sie zu messen. Diese Untersuchungen sollen auf Geweben stattfinden, welche zwei Stunden bei 100° getrocknet sind.

25. Soweit das Kommentar. Der nachstehend im Wortlaut wiedergegebene Entwurf der französischen Prüfungsvorschriften enthält 23 Forderungen, welche auf die Feststellung hinauslaufen, bis auf welche niedrigsten Werte die Eigenschaften der zu prüfenden Stoffe nicht herabgehen dürfen. Die Werte sind aber nur durch Buchstaben gekennzeichnet, eine Klassifikation ist noch nicht erfolgt.

Entwurf von Lieferungsbedingungen beim Bezug von isolierenden Geweben.

Bei der Lieferung sollen die üblichen Erklärungen über die Stärke, das Gewicht u. a. gemacht werden.

Die isolierenden Gewebe, welche für den Gebrauch in der Elektrotechnik bestimmt sind, sollen folgenden Bedingungen entsprechen:

Mechanische Eigenschaften.

1. Die Zugfestigkeit, bestimmt durch die angegebene Methode und bezogen auf 1 mm^2 , soll nicht niedriger sein als $A_1 \text{ kg}$ für nichtimprägnierte Gewebe und A_2 für imprägnierte Gewebe.

2. Die Längenänderung für alle Gewebe soll nicht unter $B \text{ vH}$ liegen.

3. Die Durchschlagsfestigkeit, zugleich mit den Zugfestigkeitsversuchen nach der angegebenen Methode gemessen, soll nicht geringer sein als $E \text{ vH}$ der Durchschlagsfestigkeit des Originalgewebes.

4. Die Durchschlagsfestigkeit, während der Druckversuche bei dem Druck von $D \text{ kg/cm}$ gemessen, soll nicht niedriger sein als $E \text{ vH}$ von der Durchschlagsfestigkeit des Originalgewebes.

5. Die Widerstandsfähigkeit, nach der angegebenen Methode gemessen, soll nicht niedriger sein als $F \text{ kg/cm}$ pro mm der Dicke.

6. Die Durchschlagsfestigkeit, nach der angegebenen Methode gemessen, soll, um die Widerstandsfähigkeit gegen Falzen festzustellen, nicht niedriger sein als $G \text{ vH}$ der Durchschlagsfestigkeit des Originalgewebes.

7. Die Dicke soll sich nicht um mehr als $\gamma \text{ vH}$ von derjenigen entfernen, welche durch den Lieferanten angegeben wird.

Physikalisch-chemische Eigenschaften.

8. Für nichtimprägnierte Gewebe soll die Feuchtigkeitsaufnahme unter den angegebenen Bedingungen nicht über H vH vom Gewicht des trockenen Gewebes hinausgehen.

9. Die Durchschlagsfestigkeit für nichtimprägnierte Gewebe soll nach dem Feuchtigkeitsversuch nicht niedriger als K_1 vH der Durchschlagsfestigkeit des Originalgewebes sein.

10. Für imprägnierte Stoffe soll die Durchschlagsfestigkeit nach dem Feuchtigkeitsversuch unter den angegebenen Bedingungen nicht niedriger sein als K_1 vH der ursprünglichen Probe und nach dem Versuch mit Wasser als K_2 vH der ursprünglichen Probe.

11. Die Verkohlungstemperatur soll nicht niedriger sein als L^0 vH.

12. Die Durchschlagsfestigkeit nach dem Aufenthalt in der Wärme unter den angegebenen Bedingungen soll nicht niedriger sein als M_1 vH der Originalprobe. Die Durchschlagsfestigkeit nach gleichem Lagern und Falzen nach der angegebenen Methode soll nicht niedriger sein als M_2 vH der Originalprobe. Die Zugfestigkeit nach dem Aufenthalt in der Wärme soll nicht niedriger sein als N_1 vH. des anfänglichen Widerstandes, und die Verlängerung soll nicht weniger betragen als N_2 vH der anfänglichen Verlängerung.

Die Durchschlagsfestigkeit nach einem Aufenthalt in der Wärme, gegen Luft geschützt, soll für imprägnierte Gewebe nicht geringer sein als P vH der Originalprobe.

13. Die Durchschlagsfestigkeit auf Grund des Versuchs der Widerstandsfähigkeit gegen Entladungen soll unter den angegebenen Bedingungen nicht niedriger sein als Q vH. der ursprünglichen Probe (für Q wurden 80 vH vorgeschlagen).

14. Die Durchschlagsfestigkeit nach dem Widerstandsversuch in Öl soll für imprägnierte Gewebe nicht niedriger sein als R vH der Originalprobe (für R wurde 100 vH vorgeschlagen).

15. Der Widerstand gegen Zug auf Grund des Versuchs der Widerstandsfähigkeit in Öl soll nicht niedriger sein als S vH des anfänglichen Widerstandes des Gewebes (für S wurden 80 vH vorgeschlagen).

16. Nach dem Lagern in Berührung mit Kupfer soll man unter den angegebenen Bedingungen im allgemeinen keine grüne Spur auf dem Kupfer oder auf dem Gewebe beobachten. Im Falle grüne Flecken entstehen, soll die Leitungsspannung nicht niedriger sein als T vH der anfänglichen Leitungsspannung (für T wurden 100 vH vorgeschlagen).

17. Der Mineralsäuregehalt soll nicht höher sein als U_1 . Der Gehalt an organischen Säuren soll nicht höher sein als U_2 .

18. Die nichtimprägnierten Gewebe, welche für die Imprägnierung bestimmt sind, sollen nicht mit Appretur bedeckt sein. Die Ölaufnahme beim Versuch auf Kapillarität hin soll nicht niedriger sein als V mm.

19. Die Durchschlagsfestigkeit soll nicht niedriger sein als W_1 V/cm für nichtimprägnierte Gewebe, als W_2 V/cm für imprägnierte Gewebe. Die Gewebe sollen (dauernd) W_3 vH ihrer Durchschlagsfestigkeit aushalten.

20. Die Leitfähigkeit soll nicht niedriger sein als X_1 V für nichtimprägnierte Gewebe und als X_2 V für imprägnierte Gewebe.

21. Der spezifische Widerstand, nach der angegebenen Methode gemessen, soll nicht niedriger sein als Y Ohm.

22. Die dielektrischen Verluste sollen unter den angegebenen Bedingungen nicht hinausgehen über Z w/ccm.

23. Die Dielektrizitätskonstante soll nicht höher sein als n .

Im Falle der Lieferant wünscht, daß sein Gewebe nicht dem einen oder mehreren der Versuche ausgesetzt werden soll, ist dies in den Bedingungen anzugeben.

XXII. Erklärungen zu den vorhergehenden Entwürfen zur Prüfung elektrischer Faserstoffe.

Prüfungsvorschriften sind keine Synthesen bekannter oder neuer Stoffe. Indes geben sie uns durch ihre Ausführung nicht nur ein Bild von dem Verhalten der Körper. Nicht nur reizen die gefundenen Werte den Fabrikanten, eine weitere Steigerung der wünschenswerten Eigenschaften vorzunehmen. Sondern die Festsetzung der Prüfvorschriften, wenn dabei sämtliche beteiligten Kreise durch rege Mitarbeit beisteuern, führen auch zu einem Überblick über alles das, was an den zu normenden Stoffen günstig oder ungünstig ist. Dabei kommen die verschiedensten Verwendungsarten zum Vorschein, und es ist kein Unglück, wenn auch solche, die zunächst wirtschaftlich oft noch unbedeutend sind, plötzlich ans Tageslicht treten. Die Erfahrungen, welche mit den elektrischen Nichtleitern auf allen ihren so außerordentlich mannigfaltigen elektrischen Anwendungsgebieten gemacht werden, und selbstverständlich ebenso hinzukommend alle theoretischen Untersuchungen, geben dem Chemiker und Technologen eine wertvolle Handhabe, Rohstoffe und Herstellungsmethoden der Isoliermaterialien so umzugestalten, daß neue Nichtleiter herauskommen, welche den gesteigerten Ansprüchen immer besser entsprechen.

Deshalb sind auch im vorhergehenden diejenigen Stimmen in kurzen Berichten wiedergegeben, welche sich zu dem veröffentlichten Entwurf geäußert haben. Eine Stellungnahme dazu hat zunächst nicht stattgefunden.

Es ist aber unmöglich, in einer Prüfungsvorschrift all und jede verhältnismäßig geringe Anwendungsart zu berücksichtigen, weil dadurch die nötige Einfachheit bei der Ausführung der Prüfung vernichtet wird. Nichtimprägnierte und imprägnierte Faserstoffe für besondere Zwecke sind daher zusätzlich zu behandeln. Die Kommission für Isolierstoffe des VDE wird sich voraussichtlich bald über die endgültige Fassung schlüssig werden.

Unter anderen fragt es sich, ob ein einfaches Hineinhängen der nichtimprägnierten und imprägnierten Faserstoffe in kaltes oder heißes Öl wirklich brauchbare Aufschlüsse darüber gibt, wie sich die Faserstoffe im Betrieb verhalten. Wie aus dem XVII. Kapitel, in welchem Transformatoren- und Schalteröle besprochen wurden, hervorgeht, zerstören die unter dem Druck des elektrischen Feldes und unter der katalytischen Wirkung der Metalle entstehenden Zersetzungsprodukte des Öls die Umspinnungen und Gewebe. Infolgedessen entsteht die Notwendigkeit, bei Prüfungen der Faserstoffe auf Ölbeständigkeit im Betrieb diesen Belastungen Rechnung zu tragen.

Ein gutes Teil zweckmäßiger gestaltet sich schon die Untersuchung, wenn die Proben längere Zeit, evtl. unter Bewegung, in gebrauchtes, also säure- und schlammhaltiges, heißes Öl getaucht werden und man auf diese Weise den Angriff der Stoffe feststellt.

Was besonders in dem französischen Entwurf für die Lieferungsbedingungen elektrischer Faserstoffe auffällt, ist die starke Betonung der Schädlichkeit nicht nur von Feuchtigkeit, sondern auch von Luft

in den Nichtleitern. Also auch bei Dielektriken geringer Stärke, wie z. B. bei imprägnierten Garnen, Geweben und Papieren, wird der darin befindliche Luftgehalt kritisch beurteilt, und eine besondere Aufmerksamkeit wurde deshalb auch dem „Altern“ geschenkt.

Es ist ernstlich zu erwägen, auch die dünnwandigen faserigen Isolierstoffe in ihrer Form als Garn, Papier und Bänder nicht mit Bindemitteln in Lösungen zu behandeln, sondern mechanisch gut aufbereitet und nach Entfeuchtung mit kolloidfeinen hochisolierenden Stoffen zu verschmelzen und zwar in indifferenten Gasen. Hydroxylionen, Wasserstoff- und Sauerstoffionen im elektrischen Feld zu belassen ist ungefähr gerade so, als wenn sich in Kesselblechen Einschlüsse von eisenersetzenden Säuren od. dgl. befinden. Durch dielektrisch richtig hergestellte dünne Nichtleiter gelangen wir zu ganz außerordentlich hohen elektrischen Festigkeiten.

Das Abreißen der Garne und Bänder, überhaupt jedes Stoffes, denken wir uns so, daß überall in den Materialien sehr feine Risse vorhanden sind, welche durch die Beanspruchung auf Zug, Torsion, Abscherung usw. bis zum Körperende erweitert werden. Jedenfalls stellen wir uns diesen Vorgang so vor, daß er nicht mit dem Feinbau der Materie zusammenhängt.

Während z. B. bei den Metallen die bleibende Dehnung durch die Abgleitung von Kristallschichten an Ebenen bestimmter Kristallformen entlang vor sich geht und dabei eine Gitterdehnung sowie eine Verfestigung der Kristalle eintritt, sind im Gegensatz hierzu die Kristalle des Zellstoffes unveränderlich. Ein Abgleiten wird hier nicht angenommen. Sondern durch Zug und Druck verändert sich nur ihre Lage. Die Einbettungssubstanz, in welcher die Zellstoffkristalle gelagert sind, ist empfindlich gegen Feuchtigkeit. Es kommen hierdurch die plastischen Dehnungserscheinungen und das Quellen zustande.

Der Zellstoff ist aufgebaut aus Faserbündeln, die Elementarfasern sind beiderseitig geschlossene spitze Röhren. Durch verbesserte optische Betrachtungen stellt man fest, daß diese ihrerseits wieder aus feinen Fasern bestehen, welche wie ein dünneres ovales Rohr in einem dickeren untergebracht sind. Man gelangt bei dieser Unterteilung der Elementarfasern, die mit Anwendung schärferer Mikroskope immer größer wird, zu den Primitivfasern oder Fibrillen, deren Zusammensetzung durch die Untersuchung mit Röntgenstrahlen und die dabei entstehenden Interferenzerscheinungen auf einer photographischen Platte als Kristalle erkannt wurden. Die Kristalle denkt man sich aus Kolloidmizellen hervorgegangen.

Je gleichmäßiger die Kristalle mit der zwischen ihnen liegenden Einbettungssubstanz verbunden sind, um so besser sind die mechanischen Eigenschaften der Faser. Gelingt es, kolloidfeine elektrisch isolierende Bindemittel bis in die feinsten Zwischenräume der Fasern hineinzubringen und dann eine dielektrisch richtige Verschmelzung, tunlichst unter Druck, vorzunehmen, so gelangen wir zu Nichtleitern, welche außer einer hohen elektrischen Festigkeit sich hinsichtlich ihres mechanischen Verhaltens, z. B. Zähigkeit, Biege- und Zugfestigkeit usw., mit den besten Metallsorten messen können.

XXIII. Anorganisches Isoliermaterial, vornehmlich Porzellan.

1. Natürliche elektrisch isolierende Materialien, wie Marmor, Schiefer, Granit und verschiedene andere Gesteinsarten, sollen hier nicht behandelt werden, sie kommen nur für niedrige Spannungen in Frage und werden infolge Durchsetzung mit leitenden Einschlüssen und wegen Hygroskopizität immer mehr durch betriebssichere künstliche Nichtleiter ersetzt. Sie sind durch K. Geisler in Schering, Die Isolierstoffe der Elektrotechnik, behandelt.

2. Glimmer, einer unserer wertvollsten Isolierstoffe, ist durch R. Schröder in dem vorgenannten Werk hinreichend ausführlich gekennzeichnet. Es bedarf hier nur der Anregung, auch die Bearbeitung der Glimmerplättchen zu Hochspannungsnichtleitern nach vorheriger Entfeuchtung auch der Bindemittel unter Ausschluß von Luft in indifferenten Gasen vorzunehmen.

3. Quarz im amorphen Zustande gehört zu unseren besten elektrischen Nichtleitern und zeichnet sich vor allem dadurch aus, daß sein Wärmeausdehnungskoeffizient außerordentlich gering ist. Die Durchschlagsfestigkeit ist erheblich größer wie im kristallisierten Zustand. Nach Lutz¹⁾ eignet sich geschmolzenes Quarzglas im Vergleich zu Bernstein deshalb besser für elektrostatische Zwecke, weil bleibende Schrumpfungen, welche bei stärkerer Abkühlung in Bernstein auftreten, in Quarz nicht beobachtet wurden. Bei W. C. Heräus wurde festgestellt, daß Quarzglas in feuchter, säurehaltiger Luft weniger empfindlich ist wie Bernstein und sich auch leichter reinigen läßt.

Über die Eigenschaften von geschmolzenem Quarz finden sich im Handbuch von Singer, Die Keramik im Dienste der Industrie und Volkswirtschaft 1923, S. 297, folgende Angaben:

Geschmolzener Quarz.

Dichte	2,10
Zugfestigkeit	über 700 kg/cm ²
Druckfestigkeit	19 800 kg/cm ²
Elastizitätsmodul	7 200 kg/cm ²
Mittlere spezifische Wärme	0,2313 (100°—1600°)
Ausdehnungskoeffizient	0,000 000 59
Wärmeleitfähigkeit	0,0026
Schmelzpunkt	1700°—1800° C
Erweichung	etwa 1500
Elektrischer Widerstand bei 727° C	400 000 Ohm
Durchschlagsfestigkeit	30 000 Volt bei 1,2 mm Dicke
Dielektrizitätskonstante	3,5—3,6
Gewichtsbeständigkeit	absolut
Chemischer Widerstand gegen H ₂ SO ₄	absolut
Chemischer Widerstand gegen NaOH	angegriffen
Durchlässigkeit für ultraviolettes Licht	bis etwa 180 μ
Härte	223 kg/mm ² in abs. Zahlen, 7 nach Mohs

4. Gläser, welche durch Schmelzen von Kalzium- und Alkalisilikaten gewonnen werden, sind bekanntlich deshalb als elektrisches Isoliermittel wenig vorteilhaft, weil der Masse die Temperaturbeständigkeit

¹⁾ C. W. Lutz, Phys. Zeitschr. 1916, S. 620.

fehlt und die Oberfläche zersetzlich ist. In geringem Maße enthält Glas Gase gelöst. Diese Gase sind nicht wie bei den gesinterten Massen atmosphärischen Ursprungs, sondern sie entstehen beim Verschmelzen durch Zersetzung der Karbonate¹⁾. Nachteilig ist für die Gläser, daß große Stücke davon durch das Abkühlen schwer spannungsfrei zu machen sind. Eine völlige Homogenität ist also trotz des amorphen Zustandes und des Entstehens aus einem Schmelzfluß auch hier nicht vorhanden.

Wie schon auf S. 21 ausgeführt wurde, vollzieht sich die Stromleitung in Gläsern nach den von Faraday aufgestellten Gesetzmäßigkeiten der Elektrolyse. Anfänglich ist die Leitfähigkeit gering. Sie steigt dann im Sinne der Formel von Hinrichsen und Rasch $\log W = V/T + C$, wo W der Widerstand, T die absolute Temperatur, V und C Konstanten sind, stark mit der Temperatur an, bis der Durchschlag erfolgt. Der Gehalt an Alkalien, vor allem an Natriumverbindungen, vermehrt die Leitfähigkeit, es zeigt sich bei den meisten Gläsern eine Abhängigkeit der Leitfähigkeit von der Viskosität und der chemischen Angreifbarkeit. Mit steigender Temperatur nimmt der Dissoziationsgrad ab. Bei hohen Felddichten können freie Elektronen im Glas durch Stoß neue Elektronen abspalten.

Pirani und Schönborn²⁾ haben in Glasperlen von ungefähr 10 mm Durchmesser zwei Elektroden in 5 mm Abstand eingeschmolzen und eine Spannung von 800 V bei 50 Per/s angelegt. Die Glasperlen wurden in einem elektrischen Ofen mit einer Heizgeschwindigkeit von 10° C je Minute erwärmt, indem die Temperatur mit Thermoelementen bestimmt und die Leitfähigkeit gemessen wurde. Für reine Silikatgläser und für kieselsäurefreie Boratgläser wurde eine eindeutige Beziehung zwischen den Durchschlagstemperaturen und dem Wert der spezifischen Leitfähigkeit gefunden.

Es wurden dann eine Anzahl Körper gepulvert, gepreßt und hochgesintert. Bei eingesinterten Elektroden in 5 mm Entfernung und Anlegen einer Spannung von 800 V und 50 Per/s ergeben sich die nachstehenden Durchschlagstemperaturen:

Schottglas 397 III	330° C
Marquardmasse	395° C
Porzellan	420° C
Basalt	470° C
Zirkallit	540° C
Gundelach-Platineinschmelzglas . .	553° C
Zinkoxyd	720° C
Speckstein	900° C
Berylliumoxyd	1000° C
Bornitrid	1100° C
Aluminiumoxyd	1200° C
Magnesiumoxyd	1200° C

¹⁾ Washburn, Footit, Bunting. Univ. Bull. Illinois 18, 32, 1920. Ref. in Chem. Zentralblatt 92, IV, 338, Sprechsaal 1921, 482. — Zschimmer, Theorie der Glasschmelzkunst. 2. Buch S. 140. Jena 1924.

²⁾ M. Pirani u. H. Schönborn, Die Bestimmung der elektrischen Durchschlagfestigkeit von Gläsern und keramischen Stoffen. Z. techn. Phys. Bd. 6, S. 351. 1925.

Bei den ersten 7 Körpern erfolgte der Durchschlag plötzlich, bei den übrigen 5 Proben stellten sich vorher Oberflächenentladungen ein.

Das von Schott unter der Bezeichnung O118 hergestellte Flintglas zeigt bei 90° C keine verringerte elektrische Festigkeit, wohl aber eine erhöhte elektrische Leitfähigkeit.

5. Basalt ist ein Eruptivgestein vom spez. Gewicht 2,8—3, bestehend aus Tonerde-Calzium-Magnesiumsilikaten. Er wird gebrochen und läßt sich bei 1300° C schmelzen. Aber durch diesen Schmelzprozeß verliert das Material seine bisherige Dichtigkeit und wird hygroskopisch. Nach einem neueren Verfahren wird der Basalt jetzt ausgeglüht und erhält angeblich dabei die Eigenschaften des Naturbasaltes zurück. Dieser Prozeß dauert je nach der Größe der Stücke stunden- und auch tagelang. Der Ausdehnungskoeffizient ist gleich dem des Eisens. Eine erhebliche elektrische Festigkeit soll er besitzen. Untersuchungen, die einen sicheren Schluß auf die technische Brauchbarkeit als Isolator zulassen, sind bisher nicht vorhanden. Insbesondere ist es fraglich, ob die Masse überall spannungsfrei ist, Temperaturwechsel verträgt und keine glasigen Einschlüsse besitzt.

6. Unter dem Namen Steatit ist eine keramische, elektrisch isolierende Masse im Handel, welche aus Magnesiumsilikaten besteht. Das pulverisierte Gestein läßt sich trocken verpressen und wird dann bei Segerkegel 14—16 gebrannt. Eine bedeutsame Eigenschaft dieser Körper ist ihr geringes Schwindmaß, welches zur Folge hat, daß die Genauigkeit der Steatitkörper größer ist wie bei Porzellan. Von allen keramischen Stoffen besitzt das Steatit die mechanisch besten Eigenschaften. Die Zugfestigkeit, Druckfestigkeit, Kugeldruckfestigkeit, Biegefestigkeit, Torsionsfestigkeit und nicht zuletzt die Schlagbiegefestigkeit sind wesentlich höher wie bei Feinsteinzeug, Porzellan und der Mittelstufe zwischen Porzellan und Steatit, dem Melalith.

Auch im Naßverfahren läßt sich die Steatitmasse aufbereiten. Da aber zur Entwicklung der plastischen Eigenschaften der Tonerdegehalt fehlt, so ist die grüne Masse beim Drehen kurz und reißt gern ab. Die Farbe des Steatits hat einen gelblichen Einschlag, die Masse ist nicht durchscheinend. Es ist möglich, das Steatit mit einer dunkelbraun aussehenden Glasur zu versehen.

Das Melalith geht aus einem Ansatz hervor, welcher teils aus Steatit, teils aus Porzellanmasse besteht. Die Fabrikation gleicht der von elektrischem Porzellan.

7. Aus der Schwierigkeit heraus, große Porzellanstücke spannungsfrei herzustellen, ist die Heranziehung auch des Steinzeugs für elektrische Isolierkörper hervorgegangen. Das Feinsteinzeug, wie es die Deutschen Ton- und Steinzeugwerke für Durchführungen bis über 4 m Länge in einem Stück herstellen, besitzt eine erheblich geringere Schwindung wie Porzellan. Der Abkühlungsprozeß nach dem Brennen hat zur Vermeidung von Spannungen sehr sorgfältig zu geschehen. Der Scherben ist gelbbraun und undurchsichtig. Näheres ist zu entnehmen aus einer Untersuchung von F. Singer, Die physikalischen Eigenschaften des Steinzeugs, Z. angew. Chem. Bd. 36, S. 290. 1923.

8. Das wichtigste keramische Isoliermaterial stellt noch immer das Porzellan dar. Ihm ist aber auf dem Hochspannungsgebiet seit einiger Zeit ein erfolgreicher Wettbewerb entstanden durch Hartpapier und Hochspannungskabel. Der unübertroffene Vorzug von dichtgebrannten keramischen Nichtleitern, also von Steatit, Melalith, Feinsteinzeug und Porzellan, ist deren Unempfindlichkeit gegen Witterungseinflüsse und scharfe chemische Reagenzien. In neuerer Zeit ist es gelungen, vor allem beim Porzellan, die Durchschlagsfestigkeit, die Beständigkeit gegen schroffe Temperaturwechsel und ebenso die mechanischen Eigenschaften erheblich zu verbessern. Teilweise ist das eine mit dem anderen zugleich erreicht worden.

Während man früher glaubte, daß nur ein reinweißer glasiger Scherben und eine hohe Transparenz das Zeichen besonderer Güte auch für elektrisches Hochspannungsporzellan bedeuten, ist diese Ansicht heute nicht mehr haltbar.

Ungefähr zur Hälfte besteht der Masseversatz für Porzellan aus Kaolin, auch Porzellanerde genannt. Unter dem Einfluß von Wasser und der Kohlensäure in der Luft findet eine Verwitterung des Feldspates und feldspathaltiger Gesteine wie Granit, welcher Feldspat, Quarz und Glimmer enthält, und vom Porphyr, welcher aus Feldspat und Quarz zusammengesetzt ist, statt. Die Silikate der Alkalimetalle gehen bei diesem Prozeß in Lösung, und Aluminiumsilikat bleibt als unlösliches Produkt zurück. Rührt man diese tonige Masse mit Wasser an, so wird sie knetbar und plastisch. Getrocknet ist Kaolin ein leicht zerreibliches Pulver. Die Masse zeigt unter starker Vergrößerung farblose triklinen Flächen. Die Kaolingruben in der Nähe von Halle sind porphyrischen Ursprungs, dagegen sind die böhmischen Kaoline aus der Granitersetzung hervorgegangen. Für Kaolin nimmt man die chemische Formel an: $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, nach der also 39,6 vH Tonerde (Al_2O_3) 46,5 vH Kieselsäure (SiO_2) und 13,9 vH Wasser (H_2O) das reine Kaolin bilden.

Die beiden anderen Ausgangsstoffe der Porzellanfabrikation sind Quarz und Feldspat, von denen jeder dieser Stoffe ungefähr ein Viertel der Gesamtmasse ausmacht. Quarz (SiO_2) wird als solcher in feingepulvertem Zustande der grünen Masse zugesetzt, er kann aber auch bereits in einem der anderen beiden Rohstoffe enthalten sein. Gewöhnlich zeigt er dann eine äußerst feine Verteilung, die für die Entstehung von gutem Porzellan sehr vorteilhaft ist.

Für Feldspat läßt sich die Formel $\text{K}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{SiO}_2$ zugrunde legen, was einem Gehalt von 16,9 vH Kali (K_2O), 18,3 vH Tonerde und 64,8 vH Kieselsäure entspricht. Früher wurde viel norwegischer Feldspat verarbeitet, welcher sehr rein ist. Wir können aber jetzt die deutschen Feldspatlager für die Porzellanherstellung ebenfalls heranziehen.

Die feingemahlten Mineralien werden durch sorgfältige Reinigung, Schlemmung und Mischung aufbereitet, zur Vergrößerung der Plastizität längere Zeit feucht gelagert und dann nochmals maschinell gut durchgearbeitet. Dann erfolgten die Formgebung und das Brennen. Die Fabrikationsvorgänge werden als bekannt vorausgesetzt.

Schon unter 500°C tritt eine chemische Veränderung des Kaolins ein, das Hydratwasser spaltet sich ab und verdunstet, Al_2O_3 und SiO_2 durchsetzen die Porzellanmasse in Form feiner Ablagerungen. Mit steigender Temperatur schreitet dieser Prozeß quantitativ fort, bis sich um 700°C herum die gesamte kieselsaure Tonerde, als Kaolin zugesetzt, von ihrem chemischen Wasser befreit hat. Die Reaktion verläuft bei weiter gesteigerten Brenntemperaturen jetzt exotherm, indem Al_2O_3 und SiO_2 aufeinander einwirken und ein neues Silikat bilden, den Sillimanit $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2$, welcher überall in amorpher Form die poröse keramische Masse durchsetzt. Geht die Ofenhitze weiter in die Höhe, so beginnen Bestandteile der Versatzmasse zu schmelzen. Dies ist zuerst beim Flußspat der Fall, welcher gegen 1200°C zunächst dickflüssig auftritt, dann bei weiter erhöhter Temperatur leichtflüssiger wird und sich auf seine Umgebung lösend betätigt.

Von Körpern, welche von dem geschmolzenen Flußspat aufgenommen werden, kommt in erster Linie die amorphe Kieselsäure in Betracht, welche sich bei der Verflüchtigung des Hydratwassers aus dem Kaolin abgeschieden hatte, weiter der feinverteilte ebenfalls in nicht kristallinischem Zustand befindliche Sillimanit und schließlich der Quarz, welcher der Versatzmasse in ungefähr einem Viertel ihrer Menge zugefügt war. Die Lösungsfähigkeit des geschmolzenen Flußspates ist für die drei genannten Lösungstoffe verschieden. Anzunehmen ist, daß die Flußspatschmelze dazu neigt, die reine Kieselsäure in höherem Maße zu lösen wie die an Tonerde gebundene Kieselsäure, den Sillimanit. Infolgedessen wird nach bestimmter Zeit Sillimanit aus der Flußspatlösung abgeschieden, es bilden sich neben gelöstem Sillimanit kristallinische Sillimanitnadeln.

Angegeben war, daß das Verhältnis von Kaolin zu Quarz zu Feldspat in der Versatzmasse 50 : 25 : 25 beträgt. Natürlich kommt es bei diesen Mineralien darauf an, aus welchen Gesteinsarten sie entstanden sind. Bevorzugt wird z. B. der aus Norwegen stammende Feldspat. Außerdem sind derartige Naturprodukte niemals ganz rein, Oxyde von Alkalien, Erdalkalien, Eisen u. a. sind vorhanden und nicht ohne Einfluß.

Es entsteht hier die Frage, ob der genannte Prozentsatz der Ausgangsstoffe für die Herstellung von Hochspannungsporzellan der bestmögliche ist. Nach dieser Richtung hin sind Versuche unternommen worden, welche zum Ergebnis haben, daß eine allzu weite Entfernung von diesen Verhältnissen zweifellos schadet. Im übrigen wurde in einer Vergleichsserie ein elektrisch wie mechanisch besonders hochwertiges Porzellan erzielt mit 50 vH Hallischer Tonsubstanz, 30 vH Quarz und 20 vH norwegischem Feldspat. Der Glattbrand erfolgte bei Segerkegel 15. Es wurden aus zwölf Versuchen die nahe beieinander liegenden Zahlen als Mittel berechnet. Bewertet wurde das Material nach der Höhe der Schlagbiegefestigkeit, welche an eckigen Stäben von 10×15 mm Querschnitt mit dem Schopperschen Pendelhammer vorgenommen wurden und $1,80 \text{ cmkg/cm}^2$ ergab, ferner nach seiner Durchschlagsfestigkeit. Diese fand an dünnen Platten unter Öl bei Benutzung von runden Elektroden von 5 mm Durchmesser statt und ergab 28700 V/mm .

Dieses ist das beste Ergebnis aus einer Reihe von Untersuchungen, welche E. Erwin Urban unternommen und darüber in einer Arbeit „Studien zur Herstellung von Elektroporzellan“ in der Keramischen Rundschau 1924, Nr. 19, S. 217, berichtet hat. Aus der mikroskopischen Betrachtung der Dünnschliffe im normalen und polarisierten Licht ist ersichtlich, daß sehr kleine Sillimanitkristalle überall gleichmäßig verteilt sind und der Glasfluß wenig Luft- und Tonteile aufweist. Im polarisierten Licht zeigen sich wenig Quarztrümmer, so daß der Versuchsansteller das Porzellan als praktisch frei von Quarzresten ansieht. Der Scherben hat einen zähen muscheligen Bruch. Eine Lösung von Fuchsin in Methylalkohol verläuft nicht. Es ist jedoch zu bemerken, daß die Widerstandsfähigkeit gegen plötzliche Temperaturwechsel bei anderen Versuchsstücken größer ist, besonders bei solchen, welche starke Luftfeinschlüsse und außerdem viele scharfkantige Quarzsubstanzteilchen besitzen. Näheres ist aus der genannten Urbanschen Veröffentlichung zu entnehmen.

Die Frage, welche Zusammensetzung man der Versatzmasse zur Erzielung eines elektrisch besonders hochwertigen Porzellans zu geben hat, kann man am besten beurteilen, wenn die Bedingungen für hohe elektrische Festigkeit an anderen Isolierstoffen vergleichsweise herangezogen werden. Eine gewisse Führung durch die hier beim Porzellan vorliegenden noch sehr unsicheren Verhältnisse und auch beachtenswerte Richtlinien ergeben sich dann. Die Forderung heißt, einen Scherben brennen, welcher weder Feuchtigkeit aufsaugen kann, noch Luft enthält, und welcher aus einer Masse besteht, die überall von gleicher chemischer Beschaffenheit und gleicher Dichte ist.

Um dies zu erreichen, muß man bei den Rohstoffen anfangen. Wie vorher ausgeführt wurde, besteht Porzellan aus dreierlei verschiedenen Körpern, die sämtlich mineralisch und hochschmelzbar sind. Reagieren derartige Massen bei großer Hitze aufeinander, so haben wir es nicht mit schnellverlaufenden Prozessen zu tun, sondern die Zeit spielt eine Hauptrolle dabei. Es ist also zu entscheiden, ob man den Verlauf der Sinterung oder Verschmelzung bei einer relativ niedrigen Temperatur vornimmt, welche infolgedessen Zeit beansprucht, oder bei einer höheren Temperatur, welche auf die chemischen Vorgänge beschleunigend wirkt. In dem einen wie in dem anderen Fall brauchen die Wechselwirkungen zwischen den vorhandenen Stoffen nicht in gleicher Weise vor sich zu gehen.

Die Reaktionsbeschleunigung kann aber nicht nur dadurch erzielt werden, daß die Flußspatschmelze auf höhere Temperaturen gebracht wird, sondern auch in der Weise, daß alle Komponenten, vor allem der Quarz, in allerfeinstem Zustande vorhanden sind. Träge chemische Bindungen und physikalische Benetzung werden erheblich beschleunigt, wenn die dabei beteiligten Stoffe an sich in feinsten Verteilung vorhanden sind und weiterhin durch eine gute Mischung dafür gesorgt ist, daß sie in enge Berührung miteinander gelangen. Rechnet man die Oberflächen aus, welche dann wirksam werden, so kann das Verhalten nicht überraschen. Es ist in den vergangenen Kapiteln für die Erzielung

hoher elektrischer Festigkeiten stets auf diesen wichtigen Punkt hingewiesen. Zweckmäßig würde sein, den Verfrittungs- und Sinterungsprozeß des Porzellans nach der Verflüchtigung des Hydratwassers unter Druck vorzunehmen. Es entstehen hier aber große technische Schwierigkeiten. Ein Vorteil bei der Fabrikation von elektrischem Porzellan besteht darin, daß die flüchtigen Wasserbestandteile leicht entweichen können und dann keine dielektrisch schädlichen Bestandteile mehr vorhanden sind oder sich bilden, deren Entfernung erforderlich ist. Ausgenommen Luft. Es kommt also darauf an, daß eine richtig gewählte Zusammensetzung des Masseversatzes gewährleistet ist und ein hinsichtlich Zeit und Temperatur richtig geleitetes Glattbrennen erfolgt.

Daß hier Unvollkommenheiten in der praktischen Ausführung dieser Maßnahmen vorhanden sind, ist jedem Fachmann klar. Die Homogenität im Versatz, die Spannungslosigkeit in dicken Stücken und die überall im Brennofen herbeizuführende, an allen Orten gleiche Höhe der Temperatur verlangen, große technische Schwierigkeiten zu überwinden. Es ist hier festzustellen, ob der Rundofen oder der Tunnelofen die beste Möglichkeit geben, die Hitze zu regulieren, d. h. die Ofenbeschickung so zu behandeln, wie es für das gute Gelingen des Brandes nötig ist.

Aus den mikroskopischen Betrachtungen der Dünnschliffe im normalen und polarisierten Licht kann der Hersteller von elektrischem Hochspannungsporzellan viel Wichtiges entnehmen, da chemische Analysen hier versagen. Auch die Behandlung des Scherbens mit Flußsäure gibt orientierenden Aufschluß. Ist ein Porzellan in seiner Masse gleichmäßig mit feinen Sillimanitkristallen durchsetzt, so zeigt sich dies, wenn eine solche Probe in 50proz. Flußsäure nur wenig angefressen wird, weil die aus Quarzfeldspat erstarrte Schmelze viel weniger widerstandsfähig gegen Flußsäure ist als Sillimanitkristalle.

Eine leichtere Beurteilung der Porzellanmasse, ob sie für Hochspannungszwecke geeignet ist, gewinnt man dadurch wieder, wenn man sich die Masse in millionenfacher Vergrößerung vorstellt. Zunächst untersucht man, ob Risse und Höhlungen vorhanden sind, welche durch Ungleichmäßigkeit beim Brennen und Überfeuern entstehen. Sie sind ein Zeichen, daß zum mindesten der Sinterungsprozeß, von der Ersatzmasse abgesehen, grob fehlerhaft ist. Blasenbildungen und Narben an den Oberflächen können auch auf Mängel im Versatz zurückgeführt werden.

Während bisher nur von den mineralischen Bestandteilen des Hartporzellans die Rede war, entdeckt man bei genügender Vergrößerung, daß Porzellanisolatoren auch Luft enthalten, und zwar durchaus nicht in geringen Mengen. Ein nur verglühter Scherben, aus welchem die mechanisch vorhanden gewesene und die chemisch gebundene Feuchtigkeit entwichen ist, stellt ein poröses Gebilde dar, in welchem das Innere des biskuitartigen Körpers durch tausend feine und weniger feine Kanäle, welche untereinander zusammenlaufen, mit der Luft in Verbindung stehen. Derartige Körper kommen für elektrische Isolierungszwecke natürlich nicht in Frage.

Bei Behandlung dieser keramischen Massen im Feuer des Glattbrandes bei ungefähr Segerkegel 16, ändert sich das Bild erheblich. Wohl erkennt man noch Lufträume, aber das weitere starke Schwinden bei erhöhter Temperatur hat diese Poren in ihrem Ausmaße vermindert. Vor allem ist aber eine sehr bedeutungsvolle Veränderung insofern eingetreten, als eine Verbindung des Porzellaninneren mit der umgebenden Luft nicht mehr vorhanden ist. Die Vorgänge des Flüssigwerdens von Feldspat, der Lösung von Silikaten darin und der Verschmelzung oder Verfrüchtung der Bestandteile zu einem Glas, welches überall feine Sillimanitkristalle enthält, hat zwar nicht zur Folge gehabt, daß sämtliche Luftbestandteile aus dem Porzellan ausgetrieben wurden, wohl aber, daß die früher vorhandenen Poren als solche verschwunden sind. Die luftgefüllten Kanälchen kommunizieren nicht mehr miteinander und nicht mehr mit der Luft, es sind mehr oder weniger umfangreiche, von der Umwelt gänzlich abgeschlossene Luftsäcke daraus geworden. Deshalb kann man auch aus Hartporzellan Gefäße herstellen, welche dauernd komprimierte Gase zu halten vermögen. Die Lufträume treten in den Dünnschliffen klar in Erscheinung, und zwar macht es den Eindruck, als ob sie bei Verwendung von Ströbelschem Flußspat und bei ungenügender Auflösung von Quarz besonders groß sind, dagegen bei Verschwinden der Quarztrümmer und einer gleichmäßigen Durchsetzung mit Sillimanitnadeln in geringerem Ausmaß und gleichmäßiger verteilt vorkommen.

Wie groß die Lufträume im Hartporzellan sind, kann man nur schätzen, weil die Bestimmung „Spez. Gewicht minus Raumgewicht“ nicht hinreichend genau genug ist. Annähernd betragen die mit Luft erfüllten Räume 5—6 vH, bei einer ganz homogenen Porzellanmasse sinkt dieser Prozentsatz. Feinsteinzeug schließt ungefähr 8 vH Luft ein. Worüber wir aber gar keine Kenntnisse besitzen, ist die Art der Zusammensetzung dieser Luft in den Säcken und Hohlräumen. Bei der vorangegangenen Ofenhitze war eine Verdünnung eingetreten. Es kann sein, daß bei der Abkühlung und der Zusammenziehung der Masse die Verdünnung ganz oder teilweise ausgeglichen ist.

Daß Hochspannungsporzellan nicht porös sein darf, ist eine unbedingte Notwendigkeit und ohne weiteres klar. Ein poröser Scherben saugt gierig Feuchtigkeit auf, die leicht bis in die Mitte des durchlässigen Isolators gelangt. Auch eine Glasierung bedeutet bei porösen Isoliermaterialien nicht viel, weil immer schwache Stellen vorhanden sind. Unter der Wirkung des elektrischen Feldes greifen die anfänglich nur in geringer Menge vorhandenen Wasserstoff- und Hydroxylionen die rauhe keramische Masse an, es entstehen neue Ladungsträger. Das Zerplatzen des Isolators geht schnell vonstatten.

Auf Porosität des Scherbens hin prüft man in der Weise, daß die frischen Bruchstellen in eine Lösung von 1 vH Fuchsin, einem stark färbenden roten organischen Farbstoff, in Methylalkohol gelegt werden, indem man zugleich auf die Flüssigkeit einen mechanischen Druck von einigen hundert Atmosphären ausübt. Selbst nach derartiger tagelanger Behandlung darf die Fuchsinlösung nicht in das Innere des Scherbens

eindringen. Bei porösem Material ist die Masse durch und durch rot geworden.

Schon wenn man einen Tintenstrich auf glasiertes Porzellan zieht, sind daraus Schlüsse auf dessen Beschaffenheit möglich. Eine schlecht verglaste Masse läuft aus.

Hinsichtlich der Zusammensetzung, welche ein gutes Hochspannungsporzellan haben soll, waren vorher die Untersuchungen von E. Erwin Urban angeführt. Mit absoluter Bestimmtheit können wir jedoch bisher noch nicht voraussagen, wie der eine oder andere Masseversatz ausfällt, weil dabei der Ofenprozeß mit zu berücksichtigen ist. Außerdem kommt es auf die schon besprochene Körnung und Mischung an. Das Schlämmen stellt auch noch ungelöste Aufgaben dar. In einer Untersuchung, Beiträge zur besonderen Kenntnis des Hochspannungsporzellans, abgedruckt in der Keramischen Rundschau 1924, Heft 38, behandelt K. H. Reichau die Frage der Zusammensetzung und des Brennens. Er kommt zum Ergebnis, daß dasjenige Porzellan auch elektrisch das wertvollste ist, welches sich auch mechanisch am besten zeigt, d. h. also ein Material, welches so homogen wie möglich ist.

Mit Reichaus Folgerung der Homogenität für die Herstellung von Porzellan für Hochspannungszwecke ist der Verfasser dieser Schrift vollständig einverstanden, weil bei einem Vergleich mit anderen Nichtleitern der Elektrizität sich überall herausstellt, daß schon geringe Unterschiede in der Dielektrizitätskonstanten der einzelnen Massebestandteile bei Belastung mit hohen Spannungen Elektrizitätswanderungen durch den Körper hervorrufen, welche zu Zerstörungen führen. Die Gleichmäßigkeit der Struktur von Hochspannungsporzellan vertreten andere Forscher ebenfalls, z. B. Urban und R. Rieke.

Letzterer weist in seinem Artikel „Die mikroskopische Prüfung keramischer Isoliermaterialien“, Electro Journal 1924, S. 71 u. a. darauf hin, daß größere Mengen von Quarz, welche nicht in der Feldspat-schmelze aufgegangen sind, deshalb schaden, weil sie Fremdkörper von ganz anderen physikalischen Eigenschaften darstellen wie die Hauptmasse des Porzellans. Sie liegen eingebettet in einer glasigen Schicht und besitzen eine andere Wärmeausdehnung wie diese. Bei 575° C hat eine beträchtliche Volumenvergrößerung der Quarzsubstanz stattgefunden, welche sich beim Abkühlen entgegengesetzt auswirkt. Das Gefüge leidet mechanisch darunter. Dasselbe wird in dielektrischer Hinsicht ebenfalls zutreffen.

Quarz ist wahrscheinlich derjenige Bestandteil des Hochspannungsporzellans, von welchem die guten mechanischen Eigenschaften abhängen, sofern man es heraus hat, ihn in richtiger Weise und entsprechender Menge mit den übrigen Mineralien aufzubereiten und zu verfritten. Mit der Höhe des Quarzzusatzes steigt die benötigte Ofentemperatur, was nicht angenehm ist. Mitgeteilt soll noch werden, daß im Gegensatz zu K. H. Reichau, welcher für die beste Hochspannungsporzellanmasse 35 vH SiO₂ vorschlägt, E. Rosenthal nur 22,5 vH SiO₂ für notwendig erachtet und die Sillimanitbildung für wenig bedeutungsvoll für die mechanischen Eigenschaften des Porzellans ansieht.

In der Annahme, daß ein homogener Scherben, in welchem der Quarz in reichlichen Mengen vertreten ist und in der Flußspatschmelze in Lösung vorkommt und welcher überall feine Sillimanitkristalle gleichmäßig verteilt enthält, für Hochspannungszwecke das beste Porzellan ist, bleibt doch noch der Luftgehalt in der Masse zu bedenken. Überall, wo in elektrischen Isolierstoffen Luft einschüsse vorkommen, treten mit der Zeit Schäden in der Isolierung auf. Der Porzellanisolator stellt also eine Masse dar, in welchem scharfzackiges Mineral und Luft in vielerlei Form hintereinander geschaltet sind, so daß überall, wo sich Silikatsubstanz befindet, diese von Luftbläschen durchsetzt und umgeben ist.

Da selbst bei homogenstem Masseversatz in allen Fällen ein namhafter Luftbestandteil des Hochspannungsporzellans bestehen bleibt, ergibt sich die Frage, wie sich ein Porzellanisolator verhalten wird, wenn die Luft durch chemisch indifferente Gase, welche vor allen Dingen keine Sauerstoffionen bilden können, ersetzt ist. Die Affinität von Sauerstoff bzw. Ozon zu organischen wie anorganischen Körpern ist bedeutend, besonders unter dem Druck eines starken elektrischen Feldes. Einschüsse von indifferenten Gasen werden vermutlich imstande sein, die Porzellansubstanz ganz erheblich widerstandsfähiger gegen einen Stromdurchgang zu machen.

Es ist also nach dem Verglühen das durch und durch poröse Porzellan an Stelle der Luft mit Kohlensäure, Stickstoff u. a. oder einem Edelgas zu sättigen und in solcher Gasatmosphäre glatt zu brennen. Man würde diese Versuche zunächst zweckmäßig an Platten durchführen, um das Material leicht prüfen zu können.

Insbesondere ist dann zu untersuchen, ob die von F. Haber in der Zeitschrift für anorganische Chemie, Bd. 59, S. 154, 1908 festgestellte Elektrolytnatur des Porzellans schon von 300° C an noch in derselben Weise erhalten bleibt. Haber und seine Mitarbeiter hatten gefunden, daß von derartigen Wärmegraden an, welche unter hohen Spannungen an Einzelstellen leicht auftreten können, das Faraday'sche Äquivalenzgesetz gilt. Als Elektroden benutzte er Quecksilber.

Es ist von amerikanischer Seite versucht worden, den wirklich durch einen Isolator hindurchgehenden Strom zu messen. Aber es stellten sich hierbei erhebliche Schwierigkeiten ein. Jedenfalls ist die Stromstärke bei 10 kV Spannung und normaler Temperatur des Porzellankörpers gering. Stellt sich aber irgendwo, veranlaßt durch Spitzenwirkung, eine hohe Felddichte auf ein Nichtleiterteilchen ein, so ist zu fragen, wie die Bestandteile des Isolierstoffes unter der Wirkung des starken elektrischen Feldes aufeinander reagieren. Fehlt in der Masse der aktive Sauerstoff, läßt sich voraussagen, daß die Verhältnisse günstiger werden.

Die Anfertigung dicker Stoffe aus Hochspannungsporzellan hat ihre Grenzen. Beim Glattbrennen im Scharffeuer gelingt es nicht, die Porzellanmasse derart in allen ihren Teilen so gleichmäßig herzustellen, daß die mechanischen und dielektrischen Eigenschaften das Höchstmaß erreichen. Ein dünner Scherben ist eher hochwertig zu erhalten, denn

die Brenntemperatur wird von ihm leichter angenommen. Je dicker das Porzellanstück ist, um so schwieriger gestaltet sich wegen der geringen Temperaturleitfähigkeit der Masse ein gleichmäßiges Glattbrennen. Aus diesem Grunde erfordern umfangreiche Scherben einen langsamen An- und Abstieg der Temperaturen. Die Prüfung der Eigenschaften eines starken Porzellanstücks gibt Aufschluß darüber, ob der Masseversatz auch im Ofen die richtige Behandlung erfahren hat. Ganz übereinstimmend im Stück ist die Zugfestigkeit und daher eine Spannungslosigkeit bei Scherben von halbwegs größerem Umfang aber bisher kaum zu erreichen.

Dieses Verhalten, zweifellos ein großer Mangel beim Porzellan, hat dazu geführt, daß die großen Isolatoren für Hochspannung nicht aus einem einzigen Stück gebrannt werden, sondern aus Einzelteilen zusammengesetzt werden müssen. Außerdem sind die Metallarmaturen mit dem Porzellan zu verbinden. Wir kommen damit zur Kittfrage.

Wie man die leitenden und nichtleitenden Teile eines Isolators miteinander vereinigt, ist Gegenstand zahlreicher Schriften geworden. Die ganze Angelegenheit soll hier nicht neu aufgerollt werden, da sie in Schering, Isolierstoffe der Elektrotechnik, Kap. 45, S. 214 nachzulesen ist. Nachstehend wird lediglich zusammenfassend über das berichtet, was seitdem wieder neuerdings über die Permanitkittung bekannt wurde.

Der Sinn dieses Verfahrens, nach welchem in Deutschland von der Porzellanfabrik Ph. Rosenthal & Co. A.-G. in Selb sowie von der AEG-Porzellanfabrik in Hennigsdorf gearbeitet wird, besteht darin, in einfachster Weise Porzellan und Metall witterungsbeständig miteinander zu verbinden, ohne daß durch die Ausmessungen und Formen von Armatur und Porzellan Bruchgefahr durch den Kitt auftritt. Mithin kann der Konstrukteur seine Isolatoren aus durchschlagschieren Scherben herstellen und durch die Formgebung der Rillen und dergleichen die mechanische Festigkeit nach Wunsch einrichten und den ganzen Aufbau des Isolators nach den Gesetzen der elektrischen Festigkeitslehre zusammenbauen.

Die Permanitkittung besteht darin, daß durch Verwendung von hydraulisch abbindenden Stoffen, wie Zement, eine feuersichere, hoch hitzebeständige Zwischenlage geschaffen ist, welche also nicht durch den Lichtbogen zu schmelzen oder zu verkohlen vermag. Damit die Treibwirkung oder sonstige chemische Veränderungen des Zements mit Sicherheit ausgeschlossen werden und eine elastische nachgiebige Schicht entsteht, werden dem Zement kolloidfeine Schmelzstoffe, wie Asphalte, künstliche oder natürliche Harze u. dgl. beigemischt. Nach der Erhärtung wird der Isolator soweit erwärmt, daß die Asphalte schmelzen. Hierdurch füllen sich die Zementporen, und die Kittmasse ist chemisch unveränderlich geworden. Die Schmelzstoffe werden so ausgewählt, daß die Erhitzung der poren ausfüllenden feuchtigkeit-abweisenden Kolloide bis zum Flüssigwerden auf ungefähr 150° C vorgenommen wird. Die Erwärmung des Porzellans darf nicht zu hoch erfolgen, da dieses sonst in seinen Eigenschaften herabgemindert wird.

A. Lottermoser, Professor für Kolloidchemie, beschäftigt sich in „Die Kolloide und ihre Bedeutung für die Technik“ mit der Kittung von Porzellanisolatoren und führt aus, daß die Sprengung des Scherbens nicht auf die verschiedenen Ausdehnungskoeffizienten von Porzellan und Zement zurückzuführen ist und daher auch nicht durch die Beimischung anderer Substanzen, wie z. B. von geschmolzenem oder zerkleinertem Quarz zwecks Anpassung des Ausdehnungskoeffizienten des Zements an den des Porzellans verhindert werden kann. Daß die Hoffnung, auf diese Weise die Sprengschäden zu beseitigen, sich nicht erfüllen konnten, liegt daran, weil sie auf einer falschen Voraussetzung beruht. Bei dem Abbindungsprozeß von Zement entstehen zuerst durch die Einwirkung des Wassers auf die Zementkörperchen äußerst feine Kristallnadeln verschiedener Kalziumverbindungen, namentlich von Trikalziumaluminat, welche eine Art Filz hervorrufen und wegen ihrer langsamen Bindung gedrungene Kristalle von Kalziumhydroaluminat mit einschließen. Dies würde der ersten Abbindung entsprechen, die aber noch kein hydraulisches Bindemittel ergibt. Vielmehr folgt auf diese Kristallisation eine plötzliche Ausscheidung von Kalziumhydro-silikat als Gel, also in gallertartiger Form, welche die vorher gebildeten Kristalle umschließt und verkittet und dann durch die nicht bis ins Innere in Reaktion getretenen Zementkörnern einer Entwässerung unterliegt, die bis zur vollkommenen Erhärtung fortschreitet. Man sieht, daß also im Innern des Zements sich Reaktionen abspielen, welche sehr lange Zeit, wenn auch langsam, immer weiter fortschreiten. Es ist deshalb auch kein Wunder, daß der Zement noch lange arbeitet, namentlich dann, wenn Wasser zu ihm Zutritt findet.

Endlich ist ein voller Erfolg eines raumbeständigen Zements durch das Permanitverfahren erzielt, indem man dem Zement die Möglichkeit langdauernder Reaktionen im Innern genommen hat. Dies wird dadurch erreicht, daß man Zement, dem Pech in feinsten Vermahlung zugesetzt worden ist, mit Wasser anmacht, bis zu einem bestimmten Grade erhärten läßt und dann durch Temperaturerhöhung das Pech im Innern zum Schmelzen bringt. Damit wird das ganze Gelgerüst mit dem Pech so durchzogen, daß eine spätere chemische Reaktion im Innern, auch bei äußerer Wassereinwirkung, und damit ein Treiben des Zements unmöglich werden.

Während die vorher wörtlich wiedergegebenen Lottermoserschen Arbeiten sich auf chemischem Gebiet bewegen, beruhen die Untersuchungen von E. Rosenthal auf physikalischen Messungen in „Die Lösung des Kittproblems im Isolatorbau“, ETZ 1924, Heft 15, S. 333 und AEG-Mitt. 1924, Heft 3, und ferner von E. Rosenthal und H. Luftschitz „Neue Erkenntnisse über den Erhärtungsprozeß des Zements und dessen Anwendungen auf den Isolatorbau“, Mitt. d. V. d. E. W. 1924, Nr. 358. Ferner berichten die Rosenthal-Mitteilungen Heft 4 über die Lösung des Kittproblems im Isolatorbau durch die Anwendung der Permanitkittung. Das Verhalten des Zements in bezug auf Ausdehnung und Schwindung, ebenso des quarzgemagerten Zements und des Permanitzements ist unter den verschiedensten Bedingungen untersucht worden

und in Zahlentabellen und Kurvenblättern belegt. Während Zement und quarzgemagerter Zement dauernden Raumänderungen unterworfen sind, ist bei Permanitzement eine Volumenvergrößerung ausgeschlossen.

A. Bültemann berücksichtigt in seiner Arbeit „Permanitgekittete Isolatoren“, ETZ 1924, Heft 39, die Art der chemischen Vorgänge bei der Abbindung und Erhärtung von Zement und erklärt die Sprengung des Scherbens. Die Abbindung und Erhärtung von kalkhaltigen hydraulisch erstarrenden Stoffen, wie Zement, stellt man sich in der Hauptsache so vor, daß kolloidales Kalkhydrosilikat, sowie in geringeren Mengen Kalkhydroaluminat und Kalkhydroferrit entstehen. Das kittende Hydrogel geht dann in ein äußerst wasserunlösliches festes Gel über, welches die Zementteilchen dicht umschließt. Diese Umsetzungen, die Bildung von molekularem Kalkhydrosilikat aus der kolloidalen Form, kommen in ihrer Größenordnung nie zur Ruhe, weil jede Temperatur- und Feuchtigkeitsänderung ein neues Gleichgewicht erfordert. Bei kolloiden Erscheinungen darf man keine stöchiometrischen Proportionen voraussetzen. Nach der Schwindung tritt die Quellung auf, oft in starkem Maße, oft kaum merklich. Je härter der Zementkitt im Alter wird, mit um so größerer Gewalt wirkt er auf die Porzellanmasse, bis er sie sprengt. Ein Lackanstrich der Kittflächen hat aus dem Grunde keinen Erfolg gehabt, weil die chemischen Vorgänge im Innern der Kittmasse nicht ausgeschlossen werden, die selbst dann noch erheblich wirksam sind, wenn man die gekitteten Isolatoren längere Zeit einer Dampfatmosphäre aussetzt. Auch hier erfolgt Bruch.

Erhärtete, gemagerte und nichtgemagerte Zemente werden bereits durch Anlegen von einigen Volt Spannung zersetzt, da sie Elektrolyte sind. Dagegen ist der nach dem Permanitverfahren verschmolzene Zementkitt ein Dielektrikum. Bei 10 kV konnten 10 mm dicke permanitverschmolzene Zementplatten nach Wasserlagerung lt. Prüfungszeugnis des Prüfamts der Wirtschaftlichen Vereinigung d. E. W. nicht durchschlagen werden, der Widerstand war $18000 M\Omega$. Bei zweistündigem Liegen im Wasserdampf nimmt dieser permanitverschmolzene Zement 0,02—0,07 vH Feuchtigkeit auf, nach 24stündiger Wasserlagerung 0,02—0,09 vH. Die hohe Wasseraufsaugefähigkeit von nichtgemagertem und gemagertem Zement ist allgemein bekannt.

Wie sehr der Zement durch die Pechverschmelzung seine Natur verändert hat, geht aus folgendem Verhalten hervor. Pulvert man gewöhnlichen erhärteten Zement, so zerstört man dadurch die wasserunlösliche Kalkhydrosilikatschicht und legt reaktionsfähige Zementkörner, die eingeschlossen waren, frei. Wird diese gepulverte Masse mit Wasser angemacht, so findet ein zweites Mal Abbindung und eine namhafte Erhärtung statt. Versucht man dasselbe mit Permanitzement, so ist es im Gegensatz zu vorher hier nicht mehr möglich, den Zement zum Abbinden zu bringen. Er bleibt chemisch unwirksam. Dies ist erklärlich, denn der Kohlenwasserstoff wird in kolloidfeinem Zustand, viel feiner wie der Zement gemahlen ist, zugesetzt und befindet sich daher im Innern der gelbildenden Teilchen. Das kolloidale Pech wird in die stark gequollenen Zementpartikel hineingearbeitet, so daß es sich beim

Schmelzprozeß mit in der Quellmasse befindet. In Selb und in Hennigsdorf sind zur Herstellung permanitgekitteter Isolatoren große Anlagen geschaffen.

Weiter liegen Beiträge über das Permanitverfahren vor von H. Luftschitz, „Isolatorenkittung“, *Keramische Rundschau* 1924, Heft 19 und von demselben Verfasser, „Die Lösung des Isolatoren-Kittproblems“ *Keramische Rundschau* 1925, Heft 19. Die letzte Arbeit stellt eine Erweiterung dar auf einen Artikel „Über Zementkitt“ im *Elektro-Journal* 1924, S. 304, von F. Gerold, welcher die Möglichkeit zuläßt, daß der Permanitkitt noch später gefährliche Änderungen zeigen kann und zur endgültigen Beurteilung eine hinreichend lange Bewährungsfrist abzuwarten ist. Dem gegenüber hat Luftschitz die Dehnungs- und Quellungserscheinungen und die Gewichtsänderungen an Zement, gemagertem Zement und Permanitzement, übersichtlich zusammengestellt, die Zunahme durch Feuchtigkeit, das Rückwachstum durch Feuchtigkeit und die kritischen Punkte des größten und kleinsten Volumens ermittelt und aufgeklärt, weshalb auch Isolatoren, welche mit Teleokitt, also Quarzzusatz zum Zement, gekittet wurden, gerissen sind. Die Untersuchungen erstrecken sich über vier Jahre und umfassen mehrere tausend Messungen. Als Ergebnisse belegen sie, daß die Verschmelzung des Zementes nach dem Permanitverfahren mit wasserabweisenden Mitteln, wie Pechen und Asphalt, die Sprengungen des Porzellanscherbens ausschließt.

Inzwischen sind mehrere Jahre hingegangen, seitdem Tausende von permanitgekitteten Isolatoren nicht nur in Gegenden mit gleichmäßigem Klima, sondern auch an südlichen und nördlichen Meeresküsten, auch auf Hochebenen mit schnell wechselnden Temperaturen wie in Spanien, in Tälern, in den Tropen von Afrika und Südamerika eingebaut. Nirgends sind durch den Kitt Permanit Zerstörungen der Isolatoren erfolgt.

Übrigens wird pechverschmolzener Zement seit acht Jahren waggonweise für elektrisch isolierende Körper hergestellt, bis zu Platten von 800 mm Länge. Würde die geringste Dissoziierung (chemische Veränderung) oder die aller kleinste Rissebildung sich mit der Zeit eingestellt haben, dann wäre die elektrische Festigkeit vernichtet. Es hat sich aber nichts derartiges gezeigt.

9. Die schwächste Seite dichtgebrannter keramischer Isolierstoffe ist ihre Sprödigkeit. Um zu beurteilen, ob eine Isolatorenkette den mechanischen Anforderungen im praktischen Betriebe genügt, kommt es nicht nur darauf an, zu wissen, wie groß die Zugfestigkeit des Porzellans, Melaliths oder Steatits ist. Auch die Kenntnis der Schlagbiegefestigkeit allein reicht hier nicht hin. Sondern, da eine Hängekette erheblichen Stößen ausgesetzt ist, muß man feststellen, welche Stöße ein keramischer Knüppel oder Strunk unter Zugbelastung aushält.

Seit einiger Zeit ist man bemüht, durchschlagssichere Isolatoren, also solche in Knüppelform, mit Hilfe eines zähen Nichtleiters von hoher Zugfestigkeit und Schlagbiegefähigkeit anzufertigen. Da aber die uns hier zur Verfügung stehenden Hochspannungsisoliermaterialien

wenig wetterbeständig sind, Porzellan aber in dieser Beziehung unübertroffen ist, so hat man sich die guten Eigenschaften beider Stoffe zunutze gemacht und ist bei der AEG zu dem sogenannten Verbundisolator gelangt. Der Name soll nur andeuten, daß hier verschiedene Nichtleiter der Elektrizität konstruktiv miteinander verbunden sind. Über dem Knüppel aus imprägniertem Holz oder Hartpapier wird ein mit Regenschutzglocken versehener Porzellanmantel gezogen, außerdem wird der dadurch entstehende Zwischenraum mit einer isolierenden Ausgußmasse gefüllt. Diese Art Freileitungsisolatoren bedeuten also ein ganz anderes Prinzip in ihrer Bauart, wie diejenigen, welche zwischen den Elektroden ausschließlich Porzellan als Dielektrikum besitzen. Vom Standpunkt der elektrischen Festigkeitslehre ist diese Anordnung, bei welcher sich die Elektroden nicht umhüllen, zweifellos vorteilhaft. Die AEG berichtet von derartigen Verbundspannern für 220 kV, daß sie eine Überschlagspannung von 620 kV und eine Zugfestigkeit von 15000 kg aufweisen.

10. Die Eigenschaften von normalem Hochspannungsporzellan, wie es von Ph. Rosenthal & Co. A.-G. hergestellt wird, also nicht einer besonderen Spezialmarke, sind die folgenden.

a) Die Zerreißfestigkeit K_z ist abhängig vom Querschnitt Q , außerdem von der Länge und der Form des Probestücks. Am günstigsten verhalten sich zylindrische Stäbe. Die Länge des Einspannkopfes soll mindestens gleich dem halben Durchmesser der Probe sein.

Bei zylindrischen Stäben ergeben sich dann nachstehende Werte:

$Q = 10$	20	30	40	50	60 cm ²
$K_z = 370$	335	315	295	275	265 kg/cm ²

Bei Isolatoren mit Rippen und 1—2 Schirmen:

$Q = 10$	20	30	40	50	60 cm ²
$K_z = 265$	240	220	205	190	182 kg/cm ²

Bei besonders sorgfältig geleiteter Fabrikation erhöhen sich die obigen Zahlen um ungefähr 10 vH. Der zu erreichende Höchstwert an glasierten zylindrischen Stäben von 50 cm² Querschnitt beträgt um 380 kg/cm² herum.

b) Bei der Bestimmung der Biegefestigkeit K_b zeigt sich der Unterschied zwischen Stäben und Isolatoren geringer. Die Streuung der gemessenen Werte ist beträchtlich und liegt in der Größenordnung bis zu 100 vH. Man kann als gutes Mittel $K_b = 500—600$ kg/cm² annehmen.

Es sind aber auch Biegefestigkeiten von 1000 kg/cm² festgestellt. Für Motorisolatoren wird eine Garantie für eine Biegefestigkeit von 350 kg/cm² übernommen.

c) Die Schlagbiegefestigkeit K_{Sch} an Rundstäben von ungefähr 300 mm Länge und einem Durchmesser von 75—85 mm beträgt im Mittel ungefähr 2,3 cm kg/cm².

d) Die elektrische Durchschlagsfestigkeit ist ermittelt an Platten mit kugelförmigen Vertiefungen vom Radius 10 mm mit sinus-

förmigem Wechselstrom von 50 Per/s. Die Elektrodenflächen wurden aufgespritzt oder galvanisch verkupfert. Die Prüfspannung wird mit 1 vH je Sekunde gesteigert.

Plattendicke	1	2	3	4	5	6 mm
Durchschlagsspannung	35	55	75	90	110	150 kV
Spannungsdichte	35	27	25	23	22	21 kV/mm

Bis 150° C ist die Durchschlagsfestigkeit unabhängig von der Temperatur. Messungen mit Stoßspannungen ergeben um 5 vH höhere Werte.

e) Der Verlustwinkel δ ist annähernd unabhängig von Spannung und Schichtdicke: $\operatorname{tg} \delta = 0,012$.

f) Die Dielektrizitätskonstante ist 5,7—6.

g) Der Porenraum macht ungefähr 3—7 vH aus. Der Einfluß desselben auf die elektrische Festigkeit steht noch nicht fest. Es kommt dabei auf die Größe und die Menge der Lufträume an.

h) Beständigkeit gegen schroffe Temperaturwechsel. Komplizierte Formen halten schroffe Temperaturwechsel zwischen 100° C und 10° C aus, einfache Formen zwischen 100° C und 0° C. Erst bei plötzlichen Wärmeänderungen von 100° C auf —20° C haben sich z. B. bei Reichspostmodellen Risse in der Glasur gezeigt.

i) Die Porosität ist gleich Null, auch bei dem sehr hohen andauernden Flüssigkeitsdruck von 300 kg/cm².

XXIV. Schlußbetrachtungen.

Die elektrischen Isolierstoffe wurden, soweit es sich dabei um Materialfragen handelt, in den vorigen Kapiteln in ihren Hauptgruppen einer kritischen Beobachtung unterzogen.

Von der Elektrotechnik werden neuerdings wieder Isolationen verlangt, welche hinsichtlich ihrer Leistungsfähigkeit über das bisher vorhandene Maß hinausgehen. Teilweise sind diese Forderungen noch durch geeignete Konstruktionen zu erfüllen. Aber es stellt sich immer häufiger heraus, daß die Formgebung allein, z. B. eine Verstärkung der isolierenden Schicht, nicht mehr die hinreichende elektrische Festigkeit gewährleistet. Uns befreit daher nichts von der Aufgabe, für die Hochspannungsanlagen Isolierstoffe zu schaffen, welche durchschlagsfester sind als bisher. Sollten wir dies nicht fertigbringen, wäre die unausbleibliche Folge eine Hemmung in der Entwicklung der elektrischen Technik in Deutschland.

Vor nicht zu langer Zeit lagen ähnliche Verhältnisse auf einem Gebiet der Eisenindustrie vor. Die Dampfmaschinentechiker und die Forscher in den chemischen Fabriken brauchten für die Ausführung ihrer neuen Ideen unbedingt Eisensorten, welche den vorhandenen in bezug auf Druckfestigkeit um eine ganz bedeutende Spannung überlegen sein mußten. Es hat sich zielbewußter deutscher Erfindergeist dahintergesetzt. Heute liefern wir von Krupp aus nach allen Teilen der Welt,

auch nach den Vereinigten Staaten, Hochspannungskessel in einer früher nicht für möglich gehaltenen Vollkommenheit. Der Wert von derartigen Dampfkesseln in Längen von 18 m und mehr, welche 120 Atm. Druck und darüber aushalten, ist ohne weiteres auch dem Nichtfachmann klar. Noch größere technische und wirtschaftliche Bedeutung liegt in der Möglichkeit, daß wir durch die verbesserten Eisensorten chemische Prozesse unter hohen Drucken durchzuführen in der Lage sind.

Eine Verbesserung der elektrischen Isolierstoffe ist wohl von noch mehr Faktoren abhängig wie die Veredelung der Metalle. An Wichtigkeit für die verarbeitende Industrie sind weitere Kenntnisse in der Technologie der Nichtleiter wirtschaftlich von erheblich größerer Bedeutung wie im Fall der Kesselbleche, da es sich bei den elektrischen Isolierstoffen nicht nur um ein Spezialgebiet handelt.

Es ist zunächst nicht einzusehen, weshalb eine Vervollkommnung der Dielektrika, und zwar in erheblicher Weise, nicht gelingen sollte, wenn die erforderlichen Bedingungen hierfür geschaffen werden. Es bestehen zum Glück noch viele Möglichkeiten, welche bisher nicht ins Auge gefaßt sind.

In der vorliegenden Schrift ist versucht, nachzuweisen, daß bei der Fabrikation der Dielektrika eine erhöhte elektrische Festigkeit der Isolierstoffe erreichbar ist:

1. durch die Entziehung aller Feuchtigkeit vor der Behandlung der Mischung mit thermisch und elektrisch hochwertigen Bindemitteln,
2. durch die Entfernung der Lufteinschlüsse vor der Behandlung mit diesen Bindemitteln,
3. durch Verschmelzen mit den kolloidfeinen Bindemitteln an Stelle einer Imprägnierung,
4. durch Herstellung einer bestmöglichen mechanischen Vermischung aller Bestandteile des elektrischen Nichtleiters, so daß durch den Verschmelzungsprozeß und durch die Behandlung unter Druck oder durch Sinterung u. a. ein einheitlicher Körper entsteht mit überall denselben Dielektrizitätskonstanten.

Um diesen Forderungen zu genügen, hat man das gesamte moderne Rüstzeug der angewandten Chemie nötig. Vorschriften allgemeiner Art lassen sich nicht geben, weil in jedem einzelnen Fall noch reichliche Neuarbeit zu leisten ist und viele praktische Erfahrungen in den Betrieben zu sammeln sind, um zum Ziel zu kommen.

Der Chemiker allein ist aber nicht in der Lage, nur von sich aus die Aufgabe zu lösen. Sondern dies ist nur möglich, wenn ihm Sachverständige aus der elektrotechnischen und physikalischen Wissenschaft und Technik zur Seite stehen, darunter sichere Meßtechniker. Es wäre eine Verschwendung, auf die Mitarbeit solcher Kreise zu verzichten und womöglich alle Untersuchungen selbst vorzunehmen. Natürlich sollen Betriebsprüfungen und landläufige Messungen im Fabriklaboratorium ausgeführt werden, schon weil sie sofort vorhanden sein müssen und außerdem der Versuchsansteller hierbei an fehlerhaften Stücken wichtige Beobachtungen machen kann.

Die Verbindung der Industrie mit wissenschaftlichen Instituten ist in diesem Fall deshalb zu pflegen, weil sehr viele Erscheinungen der Isoliertechnik erst in neuerer und neuester Zeit greifbare Formen angenommen haben, teilweise auch soweit ab vom gewöhnlich betretenen Wege liegen, daß diese oft sehr bedeutsamen Forschungsergebnisse leicht übersehen werden. Ich führe hier als Beispiel an, daß die Chemie der Kolloide in der Lage ist, viel zum Ausbau der Dielektrika beizutragen und daß von den kolloidchemischen Instituten Arbeiten geleistet werden können und müssen, für welche die Isoliertechnik das Stichwort zu geben hat. Eine Stelle, welche ausschließlich für die technische und wirtschaftliche Vervollkommnung der elektrischen Isolierstoffe zu sorgen hat, hätte also z. B. die Aufgabe, die Lehren von der Oberflächenenergie der Stoffe für die Fabrikation von Hochspannungsnichtleitern nutzbar zu machen.

Weiter muß die Verbindung hergestellt werden zwischen der auf Verbesserung ihrer Fabrikate ausgehenden Isolierstoffindustrie und den Instituten, welche sich mit elektrolytischen und elektroendosmotischen Prozessen befassen. Die Elektrochemie hat in diesem Fall mit der Isoliertechnik in besonders enger Fühlung zu stehen und gemeinsam an die hier auftretenden Probleme heranzutreten. Der Elektrochemiker wird z. B. im allgemeinen kaum über Einzelheiten unterrichtet sein, wenn es sich um die Einwirkung von Wechselströmen auf technische Dielektrika handelt, in welcher Weise z. B. die Überlagerung von Gleichstrom zustande kommt, wie sich in solchen Fällen hochfrequente Ströme verhalten, welche Änderungen hinsichtlich der Polarität entstehen, wie sich die dielektrischen Verluste auswirken usw. Alle diese Vorgänge aufzuklären, ist von außerordentlicher Bedeutung für die Isoliertechnik, denn die Zerstörung der dielektrischen Substanz hängt hiervon ab. Ehe wir die Stoffzersetzung nicht in ihrem qualitativen und quantitativen Verlauf erkennen, wird die Fabrikation von Nichtleitern in unsicherem Schritt verbleiben.

Bei diesen Untersuchungen, welche die Veränderungen der Materie durch den Strom aufklären, ist dann unter anderem auch festzustellen, wie die Stromdichte lokale Erwärmungen der Stoffteilchen zustande bringt, und es ist herauszufinden, wie diese Temperatur mit der Stoffzusammensetzung und der Art des elektrischen Feldes in Wechselbeziehungen steht. Die Ionenbildung und die Ionen werden sich unter dem Druck hoher elektrischer Feldstärken wahrscheinlich zum Teil anders betätigen, wie wir jetzt annehmen.

Da wir elektrische Isolierstoffe in den mannigfaltigsten Stoffarten und Zuständen besitzen, gasförmige, flüssige, plastische, feste, anorganische und organische usw. — sie sollen ihrer Menge halber nicht namentlich aufgezählt werden —, so ergibt sich hieraus, daß für die eben berührten Fragen die verschiedenartigsten Berufskreise an der Lösung der Aufgaben teilzunehmen haben, denn ein Keramiker pflegt nicht zugleich für Transformatoren- und Schalteröle zuständig zu sein, ebensowenig ein Lacktechniker für Gummi- und Guttaperchafabrikate oder ein Hersteller von Preßlingen für Kabel usw. Eine Hauptbedingung

für schnelles Vorwärtskommen ist hier, daß nicht etwa das eine Gebiet nach dem anderen aufgeschlossen wird, sondern daß von einer etwa vorhandenen Stelle für Isoliermaterialien sofort sämtliche in Frage kommenden Arten der Nichtleiter zugleich bearbeitet werden. Durch die sofort alle Isolierstoffe umfassende Inangriffnahme entstehen infolge der Verschiedenartigkeit der Dielektrika wertvolle Vergleichsmöglichkeiten. Im übrigen ist im Hinblick auf die Dringlichkeit des Gegenstandes erforderlich, daß zur Beseitigung der in den Betrieben auftretenden Schwierigkeiten alle staatlichen Einrichtungen, die irgend in Betracht kommen, herangezogen werden.

Während sonst derartige Arbeiten vom Elektrotechniker in die Hand genommen und geleitet werden, ist es hier zweckmäßig und direkt erforderlich, daß eine chemische Führung stattfindet. Denn es darf nicht übersehen werden, daß das sogenannte chemische Gefühl bei Materialfragen wie den vorliegenden stark mitspricht. Die Arbeit des Meßtechnikers ist selbstredend von großer Notwendigkeit.

Nur auf diese Weise, so scheint es dem Verfasser, ist dem schwierigen Gebiet beizukommen. Dabei sind wirtschaftliche Gesichtspunkte sofort mit zu berücksichtigen. Vor allem ist dahin zu wirken, daß die Zahl der unnötigen Fabrikationserzeugnisse verschwindet und wir zu bestimmten Typen gelangen, welche dann in zweckmäßiger Form und preiswürdig für die Elektrotechnik lieferbar sind.

Bei den in Forschungsinstituten sowie in den Betrieben vorzunehmenden Arbeiten ist den mikroskopischen Feststellungen und den Untersuchungen mit Röntgenstrahlen mehr Beachtung als bisher zu schenken. Nicht nur in der Keramik, sondern auch auf dem Gebiet der Hochspannungspreßstoffe erweisen sich optische Analysen als vorteilhaft. Auch ist in größeren vielseitigen Betrieben der elektrischen Isoliertechnik aus Gründen der Verbilligung der Fabrikate zu prüfen, inwieweit Abfallprodukte der einen Abteilung noch in einer anderen nutzbringend verwendet werden können.

Anzunehmen ist, daß in geschlossenen Räumen die mit Hilfe von Fasern herstellbaren Preßmassen in den Hochspannungsanlagen sehr bald eine Vorzugsstellung einnehmen werden, weil hier die erste Aussicht besteht, die dielektrischen, thermischen und mechanischen Eigenschaften erheblich zu verbessern. Die Aufgabe des Chemikers ist es u. a., in diesem Falle dafür besorgt zu sein, daß die elektrische Festigkeit bei stärkeren Dimensionen der Stücke annähernd in demselben Maße erreicht wird, wie sie dieselbe Masse bereits in dünneren Wandungen besitzt. Da die Meßtechniker festgestellt haben, daß geschichtete Nichtleiter besonders hohe dielektrische Verluste, eine verminderte Durchschlagsfestigkeit und sonstige ungünstige Eigenschaften zeigen, hat der Chemiker hieraus die Schlußfolgerung zu ziehen. Sie lautet: es ist ein Material herzustellen, welches keine nennenswerten Schichtungen oder schädlichen Einschlüsse mehr aufweist.

Im übrigen ist bei allen diesen Fragen der elektrisch isolierenden Baustoffe heute stets in Betracht zu ziehen, daß sie für die Elektrotechnik von der denkbar größten Bedeutung sind. Es kommt nicht nur dar-

auf an, daß die einzelnen Werke durch Herstellung von mittelmäßigen Fabrikaten am Jahresende gut abschneiden, sondern daß unsere Weltwirtschaft technisch auf der Höhe bleibt. Dieser Gesichtspunkt und eine hochentwickelte Isolierstoffindustrie sind keineswegs unvereinbar. Im Gegenteil, eine Belebung der Arbeiten in den Betrieben wird uns zu dem erstrebten Ziele führen.

Zum Schluß sollen E. Orlichs Ansichten wiederholt werden, welcher ausspricht, daß im Hinblick auf die vorliegenden Schwierigkeiten die zahlreichen Bestrebungen und Arbeiten auf diesem Gebiet wohl anzuerkennen sind. Aber erst dann, wenn eine Mitarbeit zahlreicher Hilfskräfte und engste Zusammenarbeit von Wissenschaft und Praxis ermöglicht ist, können die großen Aufgaben gelöst werden, die uns hier entscheidend vorwärtsbringen.

XXV. Literaturnachweis.

Auf einige früher erschienene deutsche und amerikanische Bücher über elektrische Isolierstoffe soll nicht zurückgegriffen werden, da diese inzwischen vollkommen veraltet sind.

Literaturangaben älteren Datums sind aus den nachfolgend angeführten Lehrbüchern zu ersehen. Vornehmlich sollen nachher nur die neuesten Veröffentlichungen aufgezählt werden. Einige konnten im Text dieser Schrift keine Berücksichtigung mehr finden, da sie nach Drucklegung erschienen sind.

Die erste zusammenfassende Aufstellung von Literaturangaben findet sich in Anschluß an eine Veröffentlichung von A. Schwaiger: Über elektrische Isoliermaterialien, Helios 1921, Nr. 25, 26 u. 27 und enthält 171 Quellenbezeichnungen.

Lehrbücher.

Schwaiger, A.: Elektrische Festigkeitslehre. Zweite Auflage des Lehrbuches der elektrischen Festigkeit der Isoliermaterialien. Mit 448 Textabbildungen, 9 Tafeln und 10 Tabellen. Berlin: Julius Springer 1925.

Zu jedem der 15 Kapitel über das elektrische Feld, den Durchschlag, seine Berechnung an verschiedenen Konstruktionsformen, den Überschlag, die Funkenstrecken, die elektrischen Leitungen, die Hochspannungswicklungen, die Hochspannungsisolatoren und die Errichtung eines Hochspannungsversuchsraumes sind im Anhang Forschungsarbeiten namhaft gemacht.

Schering, H.: Die Isolierstoffe der Elektrotechnik. Vortragsreihe, veranstaltet von dem Elektrotechnischen Verein E. V. und der Technischen Hochschule Berlin. Hrsg. im Auftrage des Elektrotechnischen Vereins E. V. Mit 197 Abbildungen im Text. Berlin: Julius Springer 1924.

Inhalt: 1. K. W. Wagner, Theoretische Grundlagen. — 2. K. Geisler, Natürliche Isolierstoffe, Marmor, Schiefer, Asbest, Holz. — 3. R. Schröder, Glimmer und Glimmerprodukte. — 4. W. Weicker, Keramische Isolierstoffe. — 5. A. Bültemann, Preßstoffe, Plastische Stoffe, Papier und Gespinste. Technologisches aus dem Gebiet der elektrischen Isolierstoffe. — 6. H. Jaehn, Gummi, Guttapercha und Balata. — 7. A. Eichengrün, Cellonlacke als elektrische Isoliermaterialien. — 8. F. Frank, Das Mineralöl. — 9. H. Schering, Die Prüfung der Isolierstoffe.

Die Ausführungen bringen reichliche Literaturquellen als Fußnoten.

Günther-Schulze, A.: Über die dielektrische Festigkeit. Mit 41 Abbildungen. München: Kösel & Pustet 1924.

Das Buch behandelt die dielektrische Festigkeit von gasförmigen, flüssigen und festen Körpern, ferner dielektrische Verluste und dielektrische Nachwirkung. Im Anhang befindet sich ein wertvolles, geordnetes Literaturverzeichnis, welches 262 Nachweise bringt.

Demuth, Walter: Die Materialprüfung der Isolierstoffe der Elektrotechnik. 2. Aufl. Berlin: Julius Springer 1925.

Foerster, F.: Elektrochemie wässriger Lösungen. Leipzig: Joh. Ambros. Barth.

- Koehler u. Graefe: Die Chemie und Technologie der natürlichen und künstlichen Asphalte. Braunschweig: Vieweg & Sohn.
- Nernst, W.: Theoretische Chemie. Stuttgart: Enke.
- Ostwald, W.: Grundriß der Allgemeinen Chemie. Leipzig: Engelmann.
- Schumann, W. O.: Elektrische Durchbruchfeldstärke von Gasen. Berlin: Julius Springer 1923.
- Thomson, J. J.: Elektrizitätsdurchgang in Gasen. Übersetzt von E. Marx. Leipzig: B. G. Teubner 1906.
- Fischer, F.: Einführung in die Hochspannungstechnik. Göschen 1918.
- Kock, F.: Die Keramik im Dienste der Elektrotechnik. Braunschweig: Vieweg & Sohn.
- Benischke, G.: Die Porzellanisolatoren. Berlin: Julius Springer 1921.
- Herzog, A.: Mikrophotographischer Atlas der technisch wichtigen Faserstoffe.
- Vorschriftenbuch des Verbandes Deutscher Elektrotechniker. 13. Aufl. Berlin: Julius Springer 1926.

Im vorangegangenen Buchtext sind die Vorschriften für die Prüfung elektrischer Isolierstoffe sowie die Vorschriften für Transformatoren- und Schalterröle angeführt, und zwar in vollständiger Weise, da dies für das Verständnis der Ausführungen notwendig ist. In den Vorschriften, Regeln, Normen und Leitsätzen, welche vom Generalsekretariat des VDE nach dem Stande vom 31. Dezember 1925 zusammengestellt sind, befinden sich ferner an vielen Stellen Angaben über elektrisch nichtleitende Stoffe, z. B. in den Errichtungsvorschriften, den Vorschriften für Schlagwetterschutzvorrichtungen, für elektrische Anlagen in der Landwirtschaft, für Porzellanisolatoren, für Kabel, für isolierte Leitungen u. a.

Für die Sitzungen der Studiengesellschaft für Höchstspannungen am 22. u. 23. März 1926 in Wiesbaden haben Mathias und Fitger ein umfangreiches Literaturmaterial unter der Bezeichnung: Technische Mitteilungen Nr. 13 zusammengestellt, welches für die einzelnen Verwendungszwecke der Dielektrika unterteilt ist. Es sind ungefähr 400 Nachweise bekanntgegeben.

- Bohr, Niels: Über den Bau der Atome. Berlin: Julius Springer 1925.
- Greinacher, H.: Über die Konstitution der Elektrizität. Antrittsvorlesung. Bern: Paul Haupt 1925.
- Büsing, F. W., und C. Schumann: Der Portland-Zement. Berlin: Verlag der Deutschen Bauzeitung G. m. b. H.
- Krais, P.: Handwörterbuch der Werkstoffe. Leipzig: Joh. Ambros. Barth.
- Schreiber, K. A.: Materialprüfungsmethoden im Elektromaschinen- und Apparatebau. Das Buch enthält u. a. Methoden zur Untersuchung von elektrischen Nichtleitern. Stuttgart: Enke.
- Seligmann u. Ziecke: Handbuch der Lack- und Firnisindustrie.
- Singer, Felix: Die Keramik im Dienste von Industrie und Volkswirtschaft. Braunschweig: Vieweg & Sohn.
- Wolff, H.: Die Harze, Kunstharze, Firnisse und Lacke. Leipzig: Göschen 1921.

Eine „Elektrowarenkunde“ von Prof. Dr. O. Edelmann (Nürnberg), welche auch die Isolierstoffe mit behandelt, befindet sich in Bearbeitung.

Einzelarbeiten.

Vom Telegraphentechnischen Reichsamt sind folgende Veröffentlichungen auf diesem Gebiet herausgekommen:

1. Schuler, Vergleichende Messungen an Systemkabeln. Mitt. a. d. T. V. A. Bd. 4. 1900—08.
2. Jordan, H.: Messungen dielektrischer Verluste an faserigen Isolierstoffen. Mitt. a. d. T. V. A. Bd. 6. 1910—12; ETZ 1911, S. 127—30, 160—62.

3. Wagner, K. W.: Zur Messung dielektrischer Verluste mit der Wechselstrombrücke. Mitt. Bd. 6, 1910–12; ETZ 1911, S. 1001–02.
 4. — u. A. Wertheimer, Über genaue Messungen des dielektrischen Verlustwinkels und der Kapazität mit der Wechselstrombrücke, sowie über die Bestimmung der Phasenfehler von Widerständen. Mitt. Bd. 7, 1912–14; Phys. Z. 1912, S. 368ff.
 5. — Die Messung dielektrischer Ableitungen und Kapazitäten mehradriger Kabel mit Wechselstrom. Mitt. Bd. 7, 1912–14; ETZ S. 635.
 6. — Zur Theorie der unvollkommenen Dielektrika. Ann. Phys. 1913 (4) 40, S. 817.
 7. — Theorie der dielektrischen Nachwirkung. ETZ 1913, S. 1279.
 8. — Erklärung der dielektrischen Nachwirkung auf Grund Maxwell'scher Vorstellungen. A. f. E. Bd. 2, S. 371. 1914.
 9. — Dielektrische Eigenschaften von verschiedenen Isolierstoffen. A. f. E. Bd. 3, S. 67. 1914.
 10. Untersuchungen von Hartgummiersatzstoffen, Teil I u. II. Dienstvorschriften der PTR 1916.
 11. Meyer, U.: Dielektrische Eigenschaften von künstlichen Isolierstoffen. Sonderdrucke. Berlin: Julius Springer.
 12. — Zur Theorie der dielektrischen Nachwirkung. Verhandl. d. Phys. Ges. 1917. S. 117.
 13. Lange, F.: Neuere Ergebnisse von Systemkabelprüfungen. ETZ Jg. 38, S. 441. 1917.
 14. Lübben, E.: Dielektrische Eigenschaften der Kabelpapiere. A. f. E. Bd. 10, S. 283. 1921.
 15. Meyer, U.: Über Gleichstrommessungen der Kapazität und des Isolationswiderstandes. Mitt. a. d. T. R. A. Bd. 10. Tel.- u. Fernspr.-Techn. XI, Jg. 11.
 16. Wagner, K. W.: Der physikalische Vorgang beim elektrischen Durchschlag von festen Isolatoren. Sitzungsber. d. Akad. d. Wiss., Phys.-Math. Klasse, Stück XXIX, S. 438. 1922.
 17. Meyer, U.: Ableitungsmessungen. ETZ 1923, S. 779.
 18. — Verlustmessungen an Kondensatoren. Fernmeldetechnik 1923, S. 1.
 19. — Die Isolierstoffe in der Fernmeldetechnik. El. Journ. 1924, S. 177.
- Pirani, M., u. C. Lax: Beobachtungen über Spitzenentladungen in Stickstoff. Wissenschaftl. Veröffentlichungen aus dem Siemenskonzern, Bd. 1, H. 1.
- Orago, A. C., u. J. K. Hodrette: Korona unter Öl. J. Am. Electr. Engs. Bd. 44, S. 219; Ref. ETZ 1925, S. 1490.
- Harding, Francis C.: Glimmverluste an Hochspannungsleitungen. J. Am. Electr. Engs. Oct. 1924, S. 932; Ref. ETZ 1925, S. 740.
- Whitehead, J. B.: Korona als Überspannungsschutz. J. Am. Electr. Engs., Oct. 1924, S. 914; Ref. ETZ 1925, S. 896.
- Wilkins, Roy.: Koronaverluste. J. Am. Electr. Engs. Bd. 43, S. 1109; Ref. ETZ 1925, S. 967.
- Lee, F. W., u. B. Kurrelmayer: Über Koronaspannung für verschiedene Gase bei geringen Drucken. J. Am. Electr. Engs. 1925, S. 18; Stellungnahme dazu von W. O. Schumann, ETZ 1926, S. 39.
- Neues über Salpetersäure aus Luft. Ref. ETZ 1925, S. 1008.
- Lottemoser, A.: Die Kolloide und ihre Bedeutung für die Technik. Verbandsmitt. Dresden 1924, H. 15, 16 u. 17.
- Trey, F.: Über Büschellichtschlieren. Phys. Z. 1922, S. 193.
- Möller, E.: Über die Abhängigkeit des dielektrischen Verlustwinkels und der Dielektrizitätskonstanten von der Frequenz bei Paraffin, Hexan, Xylol, Quarz, Porzellan, Hartpapieren, Preßspan und einem ionisierten Luftkondensator. A. f. E. Bd. 15, S. 16. 1925.
- Owen, W. D.: Durchschlagsfestigkeit von Isoliermaterialien. The Electrician. Bd. 94, S. 200. Ref. ETZ 1926, S. 169.

- Clark, F. W., u. V. M. Montsinger: Durchschlagsfestigkeit von faserigen Isolierstoffen bei veränderlicher Schichtstärke. Gen. El. Rev. Bd. 28, S. 286. Ref. ETZ 1926, S. 346.
- Marbury, Ralph E.: Ein neues Verfahren zur Messung der dielektrischen Absorption. J. Am. Electr. Eng. Bd. 44, S. 719. 1925. Ref. ETZ 1926, S. 311.
- Coolidge, W. D.: Über schnelle Elektronenstrahlen in freien Lufträumen. Science Bd. 11. 1925. Ref. ETZ 1926, S. 169.
- Born, M.: Über Atomtheorie. ETZ 1924, S. 889.
- Goebeler, E.: Über die dielektrischen Eigenschaften der Luft und einiger festen Isoliermaterialien bei hochgespannter Hochfrequenz. A. f. E. Bd. 14, S. 491. 1925.
- Burmester, A.: Die Bestimmung der Dielektrizitätskonstanten keramischer Massen. A. f. E. Bd. 13, S. 146. 1924.
- Grünewald, F.: Das Verhalten der Freileitungsisolatoren unter der Einwirkung hochfrequenter Schwingungen. ETZ 1921, S. 1377.
- Bucksath, W.: Allgemeine Theorie der Reflexionen von Wanderwellen und ihre Anwendung auf die Stoßprüfung von Porzellanisolatoren. ETZ 1923, S. 1021.
- Marx, E.: Versuche und Massenprüfungen mit der Stoßprüfanlage. Mitt. d. Hermsdorf-Schomburg Isolatoren G. m. b. H. 1924, H. 10.
– Versuche über die Prüfung von Isolatoren mit Spannungstößen. ETZ 1924, S. 652.
- Toepler, M.: Stoßspannung, Überschlag und Durchschlag bei Isolatoren. ETZ 1924, S. 1045.
- Binder, L.: Untersuchungen über die Vorgänge bei der elektrischen Stoßprüfung. ETZ 1925, S. 137.
- Rochow, H.: Über einige Fragen der elektrischen Festigkeitslehre. A. f. E. Bd. 14, S. 361. 1925.
- Klemm, A.: Anfangsspannung und Durchbruchfeldstärke von Kugelelektroden bei Gleichspannung. A. f. E. 1923, S. 553. Ref. ETZ 1924, S. 59.
- Schumann, W. O.: Über das Minimum der Durchbruchfeldstärke bei Kugelelektroden. A. f. E. Bd. 12, S. 593. 1923.
- Löber, H.: Anfangsspannung und Durchbruchfeldstärke von parallelen Zylinderelektroden. A. f. E. Bd. 12, S. 593. 1923.
- Dieterle, R.: Die Durchschlagsspannung fester Isolierstoffe. ETZ 1925, S. 329.
- Gabler, H.: Über den Zusammenhang zwischen Strom und Spannung in festen Dielektrizis. A. f. E. Bd. 14, S. 406. 1925.
- Zschaage, W.: Nachahmung des elektrischen Feldes von Leitungen im elektrolytischen Trog. ETZ 1925, S. 1215.
- Lohaus, O.: Nachweis einer Polarisationserscheinung bei der Elektrizitätsleitung in dem doppeltbrechenden Nitrobenzol. Phys. Z. 1926, S. 217.
- Blüh O.: Neuere Ergebnisse auf dem Gebiete der Dielektrizitätskonstanten. Phys. Z. 1926, S. 226. (Mit 172 Literaturausgaben seit 1912.)
- Shrader, I. E.: Leitfähigkeit von Isolierstoffen in der Nähe ihrer Durchschlagsspannungen. Phys. Rev. Bd. 17, S. 234–50.
- Schumann, W. O.: Über Versuche zur Natur des Durchschlages. Z. techn. Phys. 1925, S. 439.
- Rogowsky, W.: Der Durchschlag fester Isolatoren. A. f. E. Bd. 13, S. 153. 1924.
- Kármán, v.: Das thermisch-elektrische Gleichgewicht fester Isolatoren. A. f. E. Bd. 13, S. 174. 1924.
- Berger, K.: Der Wärmedurchschlag fester Isolierstoffe. BBC-Mitt. 1926, S. 115.
- Forster, A.: Über einige einfache Fälle von Bewegung unter der Wirkung der Newton-Coulombschen Anziehung. Bull. S. E. V. Bd. 15, S. 55. Ref. ETZ 1925, S. 1123.

- Schiller, H.: Über das Verhalten von Dielektriken bei hohen Feldstärken. Z. techn. Phys. Bd. 11, S. 588. 1925.
- Günther-Schulze, A.: Der Mechanismus der Glimmentladung. Z. techn. Phys. 1925, Heft 9, S. 446.
- Bjerrum, Niels: Die Verdünnungswärme einer Ionenlösung in der Theorie von Debye und Hückel. Zugleich ein Beitrag zur Theorie der Wärmeeffekte in einem Dielektrikum. Z. Phys. Chem. Bd. 119, H. 3/4. 1926.
- Sack, H.: Über die Dielektrizitätskonstante von Elektrolytlösungen. Phys. Z. 1926, Nr. 7, S. 206.
- Gehlhoff, G., u. M. Thomas: Über das elektrische Leitvermögen von Gläsern. Z. techn. Phys. Bd. 10, S. 544. 1925
- Warburg, E.: Über die Elektrolyse des festen Glases. Ann. Phys. Bd. 21, S. 622. 1884; Phys. Ber. Bd. 17, S. 193. 1884.
- Tegetmeier, W.: Über die elektrolytische Leitung des Glases und des Bergkristalls. Ann. Phys. Bd. 41, S. 18. 1890.
- Pirani, M., u. H. Schönborn: Die Bestimmung der elektrischen Durchschlagsfestigkeit von Gläsern und keramischen Stoffen. Z. techn. Phys. Bd. 7a S. 351. 1925.
- Abronn, R.: Über die elektrische Leitfähigkeit von Natron-Kalk-Silikatgläsern. Ann. Phys. Bd. 58, S. 139. 1919.
- Meurer, H.: Ein Fortschritt in der Technik der Hochspannungskabel. Z. techn. Phys. Bd. 9, S. 472. 1925.
- Kulebakin, V. S.: Über Messung von Kapazitäten mittelst Kathodenröhren. ETZ 1925, S. 923.
- Rautenfeld, F. v.: Elektrizitätsleitung in Steinsalz und Kalkspat bei hohen Temperaturen. ETZ 1925, S. 344.
- Eachron, Karl B. Mac: Photographische Aufnahmen von Hochspannungsentladungen. J. Am. Electr. Eng. Bd. 42, S. 1045. Ref. ETZ 1925, S. 354.
- Jacobi, G.: Das Dielektrikum im Lichte der neuen Atomvorstellung. ETZ 1924, S. 977.
- Zwicky, F.: Atomtheorie des festen Zustandes. ETZ 1925, S. 992.
- Schantz, C.: Materialuntersuchungen mittelst Röntgenstrahlen. ETZ 1926, S. 414.
- Karger, I., u. E. Schmidt: Über die Dehnung von Einzelfasern und Haaren. Z. techn. Phys. Bd. 4, S. 124. 1925.
- Materialuntersuchungen mit Röntgenstrahlen. Mitt. Nr. 11 aus dem Arbeitsgebiet der Koch & Sterzel A.-G., Dresden. Mit 49 Literaturangaben.
- Gebauer, C.: Kugeldruckprüfer für elektrische Isolierstoffe. Bayr. Landesgew.-Anstalt Nürnberg.
- Wiedmann, G.: Die Röntgenstrahlen und ihre Anwendung. Dresdner Verbands-Mitt. 1925, S. 192.
- Noyes, B.: Die Widerstandsänderung von Kohle und Graphit mit der Temperatur. Phys. Rev. Bd. 24, S. 190. Ref. ETZ 1926, S. 48.
- Hentschel, L.: Über das dielektrische Verhalten ölgetränkter Papiere. A. f. E. Bd. 15, S. 138. 1925.
- Wandrowsky, Hermann: Wasserdichtmachen von Papieren. Papier-Ztg. 1915, Nr. 23—31.
- Prof. Möller: Die Unterscheidungsmerkmale und Verfahren zur Erkennung und Bestimmung der Rohstoffe in den Textilerzeugnissen. Verlag der Textilzeitschrift „Der Spinner und Weber.“
- Herzog, R. O.: Fortschritte in der Erkenntnis der Faserstoffe. Z. angew. Chem. 1926, S. 297.
- Urbanus, W.: Wege und Ziele auf dem Gebiete der elektrischen Isolierungsmaterialien. Kunststoffe Jg. 15, H. 11.
- Bültemann, A.: Faserstoffe der Elektrotechnik. Elektro-Journal 1924, S. 173.
- Retzow, U.: Über einige elektrische Eigenschaften verschiedener Zellulosepapiere. Kunststoffe 1924, S. 20.
- Möllering, C. H.: Zur Prüfung faseriger Isolierstoffe der Elektrotechnik. Elektro-Journal 1924, S. 179.

- Krais, P.: Ein Apparat zur Bestimmung der Reißfestigkeit, Dehnung und Drehfestigkeit von Einzelfasern. *Textile Forsch.* 1921, H. 2, S. 86.
 Neue elektrische Fernfeuchtigkeitsmesser für die Textilindustrie. *Melliands Textilber.* Jg. 2, 19, 20 u. 21. 1921.
- Freiberger, M.: Die Wechselwirkungen zwischen Behandlungsflüssigkeiten und Fasergebilden. *Festschrift zur Textilausstellung 1924 in Dresden.* Z. ges. Textilind.
- Kalckreuth, R. v.: Die elektrischen Faserstoffe auf der Dresdner Textilausstellung. *Elektro-Journal* 1924, S. 176.
- Fabrikation von Isolierteilen aus Lonarit. Ref. *ETZ* 1925, H. 14.
- Retzow, U.: Betrachtungen über die Wärmebeständigkeit einiger künstlicher Isolierstoffe. *ETZ* 1926, S. 409 u. 443.
- Senst, W.: Isolationen aus Kunstharz und Faserstoffen. *El. Be.* 1923, H. 16, S. 193.
- Demuth, W.: Hochspannungs-Isolationen aus Hartpapier. *ETZ* 1924, S. 646.
- Turbonit. *ETZ* 1923, S. 575.
- Schneider, R.: Neuzeitliche Prüfungsmethode für Hochspannungsmaterial. *ETZ* 1925, S. 1905.
- Kuhlmann, K.: Formgebung der Durchführungsisolatoren aus Hartpapier mit Metalleinlagen. *Elektro-Journal* 1924, S. 69.
- Gubler u. Humburg: Erfahrungen mit Erzeugnissen aus Kunstharz (Bakelite). *BBC-Mitt.* 1920, S. 229.
- Baekeland, Dr. Leo, in Yonkers V. St. A.: Verfahren zur Herstellung von Kondensationsprodukten aus Phenolen und Formaldehyd. *D.R.P.* 233803.
- Scheiber, I.: Über natürliche und künstliche Harze. *Z. angew. Chem.* 1926, S. 545.
- Mannel, O.: Die elektrischen Eigenschaften des Bakelites. *A. f. E.* 1923, S. 497.
- Ephraim, J.: Die Doppelpatentierung in der Kunstharzindustrie. *Kunststoffe* 1922, Nr. 1.
- Einfluß der Form der Funkenstrecke und der Temperatur auf die Durchschlagsspannung bei Ölprüfungen. *Am. Soc. for Testing Materials, El. World* Bd. 78, S. 729, 1921. Ref. *ETZ* 1921, S. 1518.
- Friese, Rob. M.: Über die Durchschlagsfestigkeit von Isolierölen. *Wiss. Veröffentl. aus dem Siemenskonzern* Bd. 1, H. 2, S. 41. Ref. v. Oelschläger, *ETZ* 1922, S. 54.
- Stern, G.: Transformatoren- und Schalteröle. *ETZ* 1922, S. 140. Hierzu: H. Schonger, *ETZ* 1922, S. 416; G. Stern, *ETZ* 1922, S. 416 u. 453; W. Hüter, *ETZ* 1922, S. 951.
- Schröter, F.: Reinigung und Durchschlagsfestigkeit von Isolierölen. *A. f. E.* 1923, H. 1.
- Späth, W.: Die Durchschlageigenschaften von Transformatorenölen. *A. f. E.* Bd. 12, S. 33. 1923. Ref. *ETZ* 1923, S. 950.
- Buck, Th.: Öl als Dielektrikum. *El. Be.* 1923, S. 195.
- Engelhardt, V.: Messung der dielektrischen Festigkeit von Isolierölen. *A. f. E.* Bd. 13, S. 153.
- Stäger, H.: Über das Verhalten von Transformatorenölen in der Wärme. *ETZ* 1923, S. 73.
- Stickstoff-Öl-Transformator. *Elektric. Journal* 1923, S. 53. Ref. *ETZ* 1923, S. 525.
- Pitman: Ölprüfung. *El. World* Bd. 82, S. 186. 1923. Ref. *ETZ* 1924, S. 164.
- Heyden, v. d., u. Typke: Transformatorenöle. *ETZ* 1924, S. 931.
- Schendell, G.: Die Dauerhaftigkeitsprüfung der Transformatorenöle. Ref. *ETZ* 1924, S. 1415.
- Dräger, K.: Über die Leitfähigkeit und die dielektrische Festigkeit von Transformatorenöl. Ref. *ETZ* 1924, S. 727.

- Retzow, U.: Zerstörung von Stromwandlerschienen aus Zink. Werkst.-Techn. 1924, S. 257. Ref. ETZ 1924, S. 727.
- Trocknen von Transformatorenöl mittelst Zentrifugen. El. World Bd. 71, S. 473. 1921. Ref. ETZ 1922, S. 692.
- Schleudermaschine für Transformatorenöl. Ref. ETZ 1924, S. 376.
- Shrader, J. E.: Wasserbestimmung in Transformatorenöl. El. World Bd. 79, S. 174. 1922. Ref. ETZ 1922, S. 929.
- Oertel, H.: Verfahren zur Wasserbestimmung in Transformatorenölen. ETZ 1924, S. 189.
- Reiner, St.: Eine neue Wasserbestimmungsmethode in Mineralölen. ETZ 1925, S. 1447.
- Prüfeinrichtung für Transformatoren- und Schalteröle. El. Be. 1924, S. 237. ETZ (Frühjahrsmesse) 1925, S. 35.
- Behandlung des Isolieröls. Ref. ETZ 1925, S. 25.
- Temperaturverhältnisse in ölsolierten Transformatoren. Ref. ETZ 1925, S. 929.
- Ganz, B.: Kurzschlüsse an Ölschaltern in Amerika. J. Am. Electr. Eng. 1924 Maiheft. Ref. ETZ 1925, S. 930.
- Fokes, L.: Verhütung der Verschmutzung von Transformatorenöl. El. World Bd. 85, S. 105. Ref. ETZ 1925, S. 391.
- Heyden, v. d., u. Typke: Die Verteerungszahl von Transformatorenölen. ETZ 1925, S. 889.
- — Über die Notwendigkeit einer Verschärfung der Prüfbedingungen für Transformatoren-, Schalter- und Turbinenöle. ETZ 1925, S. 1264.
 - — Die Behandlung mit Fullererde, eine einfache Methode zur Reinigung gebrauchter Öle. ETZ 1925, S. 1518.
 - — Raffinationsversuch auf Verteerungszahl an einem amerikanischen Spindelöl. ETZ 1925, S. 1734.
 - — Verteerungszahl. ETZ 1926, S. 480.
- Stäger, H.: Über die Verteerungszahl und das Begutachten von Transformatoren- sowie Turbinenölen. BBC-Mitt. 1925, S. 131 u. 150.
- Über Isolieröle. Z. angew. Chem. 1926, S. 308.
- Baum, G.: Erfahrungen betr. Untersuchungsmethoden von Transformatoren-, Schalter- und Turbinenölen. Z. angew. Chem. 1926, S. 473.
- Reiner, St.: Über die Angreifbarkeit von Metallen durch Isolieröl-Harzmasse. Z. angew. Chem. 1926, S. 588.
- Fortschritt im Bau von Ölreinigungsseparatoren. ETZ 1925, S. 1415.
- Wenke, E.: Ölschalterdefekte durch Schlammablagerung und deren Meldung. ETZ 1926, S. 183.
- Französisches Pflichtenheft für die Lieferung von Lackdrähten, aufgestellt durch die „Union des Syndicats de l'Électricité“. Rév. gén. électr. Bd. 17, S. 312. Ref. ETZ 1925, S. 1740.
- Kastelski, A.: Über Kabelmuffenausgußmassen. Mitt. V. El.-Werke 1922, S. 190.
- Dr. Sedlaczek: Über die Herstellung und Reinigung des Montanwachses. Kunststoffe 1924, S. 1.
- Birnbaum, H. W.: Dielektrische Verluste in Kabeltränkmassen. ETZ 1924, S. 229.
- v. Staveren-Birnbaum, V.: Briefe an die Schriftleitung. ETZ 1924, S. 1227.
- Retzow, U.: Der Schwund der Ausgußmassen. El. u. M. 1923, H. 7. Ref. ETZ 1923, S. 816.
- Brückman, H. W. L. (Delft): Prüfung von Isoliermassen (Compounden). Rev. gén. électr. Bd. 14, S. 534. Ref. ETZ 1925, S. 3.
- Synthetischer Schellack. Mitt. 3/4 d. Bayr. Landesgew.-Anstalt Nürnberg.
- Dieterle, R.: Methoden und Apparate zur Ermittlung der Durchschlagsspannung von flüssigen und vergießbaren elektrischen Isolierstoffen. ETZ 1924, S. 513.
- Brückman, H. W.: Karetnja, ein Isoliermaterial für Kabel. ETZ 1925, S. 1732.

- Cathala, J.: Prüfapparat für Emailedraht. *Compt. Rend. Hebdom.* Bd. 180, S. 380. 1925. Ref. ETZ 1925, S. 1558.
- Sorge, A.: Über die elektrische Festigkeit einiger flüssiger Dielektrika. Ref. ETZ 1924, S. 503.
- Schob, A., u. W. Reglin: Mechanisch-technologische Untersuchungen des Staatlichen Materialprüfungsamtes Berlin-Dahlem an Isolierlacken für die Elektrotechnik. ETZ 1926, S. 626.
- Fonrobert, E.: Die Albertole. *Kunststoffe* 1923, Nr. 11 u. 12.
- Bericht über die Arbeit des Ausschusses für Isolierlacke des Zentralverbandes der deutschen elektrotechnischen Industrie. ETZ 1925, S. 394.
- Marcusson, I.: Die Polymerisation fetter Öle. *Z. angew. Chem.* 1926, S. 476. Vorher: 1925, S. 780 u. a.
- Flight, S.: Die Untersuchung von Isolierlacken. *El. Review* Bd. 89, S. 771. 1921. Ref. ETZ 1922, S. 848.
- Klein, M.: Emailedraht. 1923, S. 214.
- Ein neuer Lackprüfapparat. ETZ 1923, S. 1312.
- Scheiber, J.: Über Trocknung von Isolierlacken. *Elektro-Journal* 1923, S. 187.
- Frydlender, H.: Die Verwendung der Cumaronharze in der Lackindustrie und zu anderen Zwecken. *Kunststoffe* 1922, S. 81.
- Casselmann, E. J.: Die Wirkung des Alters auf synthetische Harzschmelzprodukte der Phenolformaldehydgruppe. *Chem. Age*, Oct. 1923, S. 443. *Kunststoffe* 1924, S. 8.
- Haas, F.: Bestimmung des Ortes erhöhten Widerstandes an Einfachleitungen mit großer Ableitung. *A. f. E.* Bd. 15, S. 44. 1925. Ref. ETZ 1925, S. 1492.
- Bormann, Dr. Elisabeth, u. J. Seiler: Dielektrische Verlustmessungen an einem verlegten Hochspannungskabel. ETZ 1925, S. 114.
- Del Mar u. Hanson: Hochspannungskabel mit getränkter Papierisolation. *J. Am. Electr. Engs.* Bd. 43, S. 950. Ref. ETZ 1925, S. 90.
- Gurewitsch, P.: Neue Fortschritte in der Unterseekabel-Telegraphie. ETZ 1925, S. 304 u. ETZ 1925, S. 1924.
- Droste, H. W.: Über die Spannung und Stromverteilung in von Starkstromleitungen induktiv beeinflussten pupinisierten Kabeladern. *A. f. E.* Bd. 14, S. 293. 1925. Ref. ETZ 1925, S. 311.
- Brooklyn Edison Co.: Ungeklärte Erscheinung an Hochspannungskabeln. *J. Am. Electr. Engs.*, Febr. 1925, S. 141. Ref. ETZ 1925, S. 424.
- Dieterle, R., u. G. Eggeling: Vergleich von Drehstromkabeln verschiedener Ausführungsformen. ETZ 1924, S. 1366.
- Cole, W. H.: Kabeldurchschläge in Hochspannungsnetzen. *El. World* Bd. 83, S. 1087. Ref. ETZ 1924, S. 1352.
- Craemer, P., u. Müller, Ew.: Neue Versuche mit pupinisierten Fernsprechkabeln. ETZ 1925, S. 1577.
- 130-kV-Kabel. Luigi Emanuelli *L'Energia Elettrica* 1925. Ref. ETZ 1925, S. 1740.
- Das 132-kV-Kabel in Neuyork. Ref. ETZ 1925, S. 1740.
- Ein schwedisches Bahnfernsprechkabel. Ref. ETZ 1926, S. 88.
- Müller, Hans: Das Aufbringen der Papierisolation auf Leiter von Starkstromkabeln. Eine werkstattechnische Untersuchung. ETZ 1926, S. 145.
- A. E. G. Präzisions-Flechtmaschine mit 16, 24, 36 und 48 Spulen. ETZ 1926, H. 10.
- Kabelverlegungswagen. ETZ 1926, S. 455.
- Kabelmeßgerät für kombinierte Isolations- und Kapazitätsmessungen mit Gleichstrom. ETZ 1925, H. 31.
- Die Korrosion von Bleikabeln durch Eichenholz. *El. Review* Bd. 90, S. 690. Ref. *Jähn* ETZ 1924, S. 562.
- Haehnel, O.: Eine neue Art von Bleikabelkorrosion. Ref. ETZ 1925, S. 1489.
- Die Korrosion von Bleimänteln. Ref. ETZ 1925, S. 897.
- Higgins, P. Kerr.: Die Bekämpfung der Elektrolyse von Kabeln. *Telephone Eng.* Bd. 29, S. 17. 1925. Ref. ETZ 1926, S. 424.

- Die Prüfung von Hochspannungsbleikabeln mit imprägnierter Papierisolation. Transmission und Distribution Committee. J. Am. Electr. Engs. Bd. 42, S. 247. 1923 und Bd. 44, S. 150. 1925. Ref. ETZ 1925, S. 1780.
- Brückman, H. W. L., u. A. C. Piyl: Einige merkwürdige dielektrische Versuche. ETZ 1926, S. 14.
- Krämer, Herm.: Über die Beeinflussung der Durchschlagsfestigkeit von Hochspannungskabeln durch Ionisierung. Diss. Darmstadt. Ref. ETZ 1926, S. 85.
- Meyer, Ulfilas: Die Eigenschaften von Krarupleitungen. ETZ 1925, S. 1033.
- Wagner, K. W.: Ein wichtiger Fortschritt in der Seekabeltelegraphie. ETZ 1925, S. 1581.
- Kock, F.: Hochspannungsisolatoren für Freileitungen. Leipzig: Hachmeister & Thal 1921.
- Singer, F., u. E. Rosenthal: Die physikalischen Eigenschaften des Porzellans. Ber. Dt. Keram. Ges. Bd. 1, H. 3. 1920.
- Rosenthal, E.: Hochspannungsisolatoren. Berlin: Julius Springer 1921.
- Singer, F.: Die Probleme der Porzellanindustrie im Wechsel der Zeiten. Dtingler, Festschrift 1920.
- Über die Temperaturbeständigkeit keramischer Massen. Ber. Dt. Keram. Ges. August 1923.
- Über die Zähigkeit keramischer Massen. Ber. Dt. Keram. Ges. 1921.
- Binz, A.: Steinzeug und chemische Industrie. Z. angew. Chem. 1923, S. 285.
- Singer, F.: Die Eigenschaften des Steinzeugs. Z. angew. Chem. 1923, S. 290.
- Steinzeug als Konstruktionsmaterial für Hochspannungsisolatoren. El. Journal 1924, S. 1.
- Urban, E. Erwin: Steinzeug als Isolationsmaterial in der Elektrotechnik. Keram. Rundschau 1924, S. 229.
- Bucksath, W.: Die Baustoffe der Freileitungsisolatoren und ihre Anwendung in den verschiedensten Konstruktionen. Steamag Nachr. 1924, H. 4/5.
- Steatit. Keram. Rundschau 1924, S. 233.
- Basalt als Isoliermittel für Hochspannung. Rev. gén. électr. Bd. 8, S. 451. 1921. Ref. ETZ 1922, S. 622.
- Grünewald, F.: Über die Durchschlagsfestigkeit verschiedener Glimmersorten bei 50-periodigem Wechselstrom. ETZ 1924, S. 1084.
- Rosenthal, E.: Die Lösung des Kittproblems im Isolatorenbau. ETZ 1924, S. 333. Dazu Hermsdorf-Schomburg Isolatoren G. m. b. H. ETZ 1924, S. 764.
- u. Luftschitz, H.: Die Lösung des Kittproblems im Isolatorenbau. Rosenthal-Mitt., H. 4.
- Luftschitz, H.: Isolatorenkittung. Keram. Rundschau 1924, S. 226.
- Gerold, E.: Über Zementkitt. El. Journal 1924, S. 304.
- Rosenthal, E., u. H. Luftschitz: Neue Erkenntnisse über den Erhärtungsprozeß des Zements und deren Anwendung auf den Isolatorenbau. Mitt. V. E. W. 1924, S. 113.
- Bültemann, A.: Permanitgekittete Isolatoren. ETZ 1924, H. 39. Dazu Hermsdorf-Schomburg Isolatoren G. m. b. H. ETZ 1924, S. 1454.
- Luftschitz, H.: Die Lösung des Isolatoren-Kittproblems. Zement 1925, S. 293. El. Journal 1925, S. 136.
- Hummel, A.: Über Volumenveränderungen, die Festigkeit und die Wasserdichtigkeit von Beton bei Verwendung von Portland-Zement und von hochwertigem Tonerde-Zement. Bauing. 1924, H. 5.
- Dampfhärten von Zementwaren. Tonind.-Ztg. 1920, S. 804.
- Untersuchung über Erhärtung nach Einwirkung niedriger Temperaturen. Zentralbl. Bauverw., April 1923. Ref. Zentralbl. 1923, S. 272.
- Kleinlogel, A.: Die Lagerbeständigkeit von Zement. Dt. techn. Warte 1924, S. 302.

- Rüth, G.: Versuche über Verwertung hochwertigen Portlandzements in der Praxis. Beton und Eisen. 1924.
- Schwaiger, A.: Über die Entladungsvorgänge auf Isolatoren. Rosenthal-Mitt., H. 6.
- Bredow, Ing.: Die Prüfung von Hochspannungsisolatoren. Keram. Rundschau 1924, S. 222.
- Demuth, W.: Die mechanisch-technische Werkstoffprüfung in der Porzellanfabrikation. ETZ 1922, H. 18 u. Mitt. Porzellanfabr. Hermsdorf-Schomburg G. m. b. H., H. 5.
- Pfeiffer, R.: Neue Untersuchungsergebnisse bei der technisch-mechanischen Prüfung von elektrotechnischem Porzellan. ETZ 1925, S. 1391.
- Die Isolatorenfrage der modernen drahtlosen Großstationen. Keram. Rundschau 1924, S. 232.
- Pfeiffer, R.: Porositätsprüfung an technischem Porzellan. ETZ 1925, S. 1078.
- Marx, E.: Erzeugung von verschiedenen Hochspannungsarten zu Versuchs- und Prüfzwecken. ETZ. 1925, S. 1298.
- Dräger, K.: Über Verlustwinkel- und Kapazitätsmessungen an Porzellanisolatoren. ETZ 1925, S. 683. Rosenthal-Mitt., H. 7.
- Fraser, W. A., u. H. W. M. Secord: Messung des durch einen Porzellanisolator fließenden Stroms. El. World Bd. 83, S. 282. Ref. ETZ 1924, S. 1251.
- Marx, E.: Die Stromaufnahme von Hängeisolatoren und ihr Einfluß auf die Spannungsverteilung an Isolatorenketten. ETZ 1925, S. 81.
- Bucksath, W.: Elektrische Stoßprüfung von Porzellanisolatoren. Rosenthal-Mitt., H. 2.
- Reichau, K. H.: Beiträge zur besseren Kenntnis des Hochspannungsporzellans. Keram. Rundschau 1924, Nr. 38.
- Urban, E. Erwin: Studien zur Herstellung von Elektroporzellan. Keram. Rundschau 1924, S. 217.
- Rieke, R.: Die mikroskopische Prüfung keramischer Isoliermaterialien. El. Journal 1924, S. 71.
- Gerold, E.: Über einige mechanische Eigenschaften von Porzellan. Keram. Rundschau 1924, S. 225.
- Einfluß des Glases auf einige physikalische Eigenschaften von Porzellan. Mitt. Hermsdorf-Schomburg Isolatoren G. m. b. H., H. 15. Ref. ETZ
- Beham, C. F.: Betriebserfahrungen mit Hängeisolatoren. J. Am. Inst. El. Eng. Bd. 42, S. 1257. Ref. ETZ 1924, S. 959.
- Lombardi, L.: Graphische Statistik über Isolatoren Schäden. L'Entreteneica Bd. 9, Nr. 8, S. 172. Ref. ETZ 1923, S. 37.
- Panton, H. D.: Versagen von Kettenisolatoren in Hochspannungsleitungen. J. Am. Inst. El. Eng. Bd. 44, S. 474. Ref. ETZ 1925, S. 1552.
- Weicker, W.: Minderung der Kettenisolatoren durch gleichzeitige mechanische und elektrische Beanspruchung mit Wechselstrom und Spannungstoß. ETZ 1926, S. 177.
- Verbundisolator. Mitt. V. E. W. Bd. 6, S. 385. Ref. ETZ 1924, S. 691. ETZ 1925, H. 10.
- Smith, H. B.: Ein neuer amerikanischer Hängeisolator. J. Am. Inst. El. Eng. Bd. 43, S. 689. Ref. ETZ 1925, S. 501.
- Durchschlagsichere Stützisolatoren. ETZ 1926, H. 13.
- Altmann, C.: Neue Vorschläge für die Isolierung von Vollbahn-Oberleitungen. ETZ 1924, S. 1022.
- Regerbis, Dipl.-Ing.: Die Messung der Spannungsverteilung und des Feldlinienverlaufs an Isolatorenketten. ETZ 1925, S. 298.
- Schwaiger, A., u. Rebhahn, J.: Die Glimmdurchführung. ETZ 1925, S. 729.
- Bach, W.: Überführungs- und Trennisolatoren für Schwachstromleitungen. Siemens Z. 1925, S. 145. Ref. ETZ 1925, S. 851.

Die Isolierstoffe der Elektrotechnik. Vortragsreihe, veranstaltet von dem Elektrotechnischen Verein E. V. und der Technischen Hochschule, Berlin. Herausgegeben im Auftrag des Elektrotechnischen Vereins E. V. von Prof. Dr. H. Schering. Mit 197 Abb. im Text. (396 S.) 1924. Geb. RM 16.—

Die Materialprüfung der Isolierstoffe der Elektrotechnik. Herausgegeben von Walter Demuth, Oberingenieur, Vorstand des Mechan.-Techn. Laboratoriums der Porzellanfabrik Hermsdorf i. Th., unter Mitarbeit der Oberingenieure Hermann Franz und Kurt Bergk. Zweite, vermehrte und verbesserte Auflage. Mit 132 Abb. im Text. (262 S.) 1923. Geb. RM 12.—

Elektrische Festigkeitslehre. Von Prof. Dr.-Ing. A. Schwaiger, München. Zweite, vollständig umgearbeitete und erweiterte Auflage des „Lehrbuchs der elektrischen Festigkeit der Isoliermaterialien“. Mit 448 Textabbildungen, 9 Tafeln und 10 Tabellen. (482 S.) 1925. Gebunden RM 27.—

Mitteilungen der Porzellanfabrik Ph. Rosenthal & Co. A.-G.

Heft 1: Neuere Forschungsergebnisse auf dem Gebiete der Hängeisolatoren. Von Prof. Dr.-Ing. A. Schwaiger, München. Mit 23 Textabbildungen. (28 S.) 1923. Vergriffen

Heft 2: Elektrische Stoßprüfung von Porzellan-Isolatoren. Von Dr.-Ing. W. Bucksath. Mit 53 Textabbildungen. (86 S.) 1924. RM 3.60

Heft 6: Über die Entladungsvorgänge auf Isolatoren. Von Prof. Dr.-Ing. A. Schwaiger, München. Mit 23 Textabbildungen. (23 S.) 1925. RM 1.50

Heft 7: Über Verlustwinkel- und Kapazitätsmessungen an Porzellan. Von Dr.-Ing. K. Draeger, Oberingenieur der Porzellanfabrik Ph. Rosenthal & Co., A.-G., Selb in Bayern. Mit 22 Textabbildungen. (36 S.) 1925. RM 2.10

Heft 8: Über Zerstörungs- und Alterungserscheinungen an Porzellan-Isolatoren. Von Dr.-Ing. K. Draeger, Oberingenieur der Porzellanfabrik Ph. Rosenthal & Co., A.-G., Selb in Bayern. Mit 16 Textabbildungen. Erscheint Ende Juni 1926

Heft 3, 4 und 5 erschienen im Selbstverlag der Porzellanfabrik Rosenthal und sind von dort zu beziehen.

Die Porzellan-Isolatoren. Von Prof. Dr. Gustav Benischke. Zweite, erweiterte Auflage. Mit 162 Abbildungen im Text. (116 S.) 1923. RM 4.80; gebunden RM 5.60

Elektrische Durchbruchfeldstärke von Gasen. Theoretische Grundlagen und Anwendung. Von Prof. W. O. Schumann, Jena. Mit 80 Textabbildungen. VII, 246 Seiten. 1923. RM 7.20; gebunden RM 8.40

Isolierte Leitungen und Kabel. Erläuterungen zu den Normen für isolierte Leitungen in Starkstromanlagen, den Normen für isolierte Leitungen in Fernmeldeanlagen, den Normen für umhüllte Leitungen und den Kupfernormen. Im Auftrage des Verbandes Deutscher Elektrotechniker herausgegeben von Dr. Richard Apt. Zweite Auflage. Mit 7 Textabbildungen. (147 S.) 1924. RM 6.90

Erläuterungen zu den Vorschriften für die Konstruktion und Prüfung von Installationsmaterial, den Vorschriften für die Konstruktion und Prüfung von Schaltapparaten für Spannungen bis einschl. 750 V und den Normalien über die Abstufung von Stromstärken und über Anschlußbolzen. Im Auftrage des Verbandes Deutscher Elektrotechniker herausgegeben von Generalsekretär Georg Dettmar. Mit 46 Textabbildungen. (202 S.) 1915. Unveränderter Neudruck. 1922. RM 3.75

Vorschriftenbuch des Verbandes Deutscher Elektrotechniker.

Herausgegeben durch das Generalsekretariat des VDE. Dreizehnte Auflage.
Nach dem Stande am 31. Dezember 1925. (798 S.) 1926. Gebunden RM 13.—
Vorzugspreis für Mitglieder des VDE RM 10.—

Erläuterungen zu den Vorschriften für die Errichtung und den Betrieb elektrischer Starkstromanlagen einschließlich Bergwerksvorschriften und zu den Bestimmungen für Starkstromanlagen in der Landwirtschaft. Im Auftrage des Verbandes Deutscher Elektrotechniker herausgegeben von Dr. C. L. Weber, Geh. Regierungsrat. Fünfzehnte, erweitert u. verbess. Aufl. (340 S.) 1926. RM 6.—

Comparison of Principal Points of Standards for Electrical Machinery. (Rotating Machines and Transformers.) By Dipl.-Ing. **Friedr. Nettel.** (42 S.) 1923. RM 2.50; gebunden RM 3.—

Standards compared:

Germany: Verband Deutscher Elektrotechniker (VDE)

Britain: 1. British Engineering Standards Committee (B. E. S. A.)

2. British Electrical and Allied Manufacturers Association.
(B. E. A. M. A.)

U. S. A.: Standards of the American Institute of Electrical Engineers (AIEE)

Elektrische Schaltvorgänge und verwandte Störungserscheinungen in Starkstromanlagen. Von Prof. Dr.-Ing. und Dr.-Ing. e. h. **Reinhold Rüdberg**, Chef-Elektriker, Privatdozent, Berlin. Zweite, berichtet. Aufl. Mit 477 Abbild. im Text u. 1 Tafel. (518 S.) 1926. Geb. RM 24.—

Kurzschlußströme beim Betrieb von Großkraftwerken. Von Prof. Dr.-Ing. und Dr.-Ing. e. h. **Reinhold Rüdberg**, Chef-Elektriker, Privatdozent, Berlin. Mit 60 Textabbildungen. (79 S.) 1925. RM 4.80

Schaltungsbuch für Gleich- und Wechselstromanlagen. Dynamomaschinen, Motoren und Transformatoren, Lichtanlagen, Kraftwerke und Umformerstationen, unter Berücksichtigung der neuen vom VDE festgesetzten Schaltzeichen. Ein Lehr- und Hilfsbuch von Oberstudienrat Dipl.-Ing. **Emil Kosack**, Magdeburg. Zweite, erweiterte Auflage. Mit 257 Abbildungen im Text und auf 2 Tafeln. (208 S.) 1926. RM 8.40; gebunden RM 9.90

Die elektrische Kraftübertragung. Von Oberingenieur Dipl.-Ing. **Herbert Kyser.** In 3 Bänden.

Erster Band: **Die Motoren, Umformer und Transformatoren.** Ihre Arbeitsweise, Schaltung, Anwendung und Ausführung. Zweite, umgearbeitete und erweiterte Auflage. Mit 305 Textfiguren und 6 Tafeln. (432 S.) 1920. Unveränderter Neudruck. 1923. Gebunden RM 15.—

Zweiter Band: **Die Niederspannungs- und Hochspannungs-Leitungsanlagen.** Ihre Projektierung, Berechnung, elektrische und mechanische Ausführung und Untersuchung. Zweite, umgearbeitete und erweiterte Auflage. Mit 319 Textfiguren und 44 Tabellen. (413 S.) 1921. Unveränderter Neudruck. 1923. Gebunden RM 15.—

Dritter Band: **Die maschinellen und elektrischen Einrichtungen des Kraftwerkes und die wirtschaftlichen Gesichtspunkte für die Projektierung.** Zweite, umgearbeitete und erweiterte Auflage. Mit 665 Textfiguren, 2 Tafeln und 87 Tabellen. (942 S.) 1923. Gebunden RM 28.—