

Chemie und Technologie der Kunststoffe  
in Einzeldarstellungen

Herausgegeben von G. Pfestorf

---

---

1

---

---

# Prüfung und Bewertung elektrotechnischer Isolierstoffe

Von

Dr.-Ing. **Rudolf Nitsche** und Dr. phil. **Gerhard Pfestorf**

Professor, Staatliches Materialprüfungsamt  
Berlin - Dahlem

Reg. - Rat, Physikalisch - Technische  
Reichsanstalt, Berlin - Charlottenburg

Mit 190 Abbildungen im Text



Berlin  
Verlag von Julius Springer  
1940

ISBN 978-3-642-98349-8

ISBN 978-3-642-99161-5 (eBook)

DOI 10.1007/978-3-642-99161-5

**Alle Rechte, insbesondere das der Übersetzung  
in fremde Sprachen, vorbehalten.**

**Copyright 1940 by Julius Springer in Berlin.**

**Softcover reprint of the hardcover 1st edition 1940**

## Vorwort.

In den letzten Jahren ist nicht nur die Verwendung von Isolierstoffen, sondern auch die Zahl der Isolierstoffe, die für verschiedene Sonderzwecke zur Verfügung stehen, recht erheblich gestiegen. Ein ausführliches Schrifttum unterrichtet über die Fortschritte, die in chemischer und physikalischer Hinsicht hauptsächlich auf den Gebieten der organischen Kunststoffe und der keramischen Isolierstoffe erzielt worden sind. Für die Prüfung und Bewertung der Isolierstoffe steht das Vorschriftenbuch des Verbandes Deutscher Elektrotechniker (VDE) zur Verfügung. Durch das Anwachsen des Vorschriftenwerkes von Jahr zu Jahr infolge der Aufnahme neuer Sachgebiete war es unvermeidlich, die Isolierstoffvorschriften bei Neubearbeitungen möglichst knapp zu formulieren. Erläuterungen zu den VDE-Prüfvorschriften mußten deshalb aus Raummangel fortfallen. Das vorliegende Buch will, einer Anregung aus den Kreisen des Isolierstoff-Ausschusses des VDE folgend, dem Prüftechniker zu den VDE-Prüfbestimmungen Hinweise und Erklärungen geben.

Da die Prüftechnik in den Vordergrund gestellt wird, ergibt sich zwangsläufig eine einheitliche, zusammenfassende und vergleichende Behandlung der verschiedenartigen Prüfverfahren, die zur Ermittlung einer bestimmten Eigenschaft dienen. Dabei werden auch bewährte und genormte ausländische Verfahren mitbehandelt, soweit sie für die spätere Ausgestaltung oder Vereinfachung der Prüfmethodik Anregungen bieten.

Die Prüfverfahren für organische Kunststoffe, deren Entwicklung auch von dem „Fachausschuß für Kunst- und Preßstoffe des Vereins Deutscher Ingenieure“ gefördert wird, werden, ihrer heutigen Bedeutung entsprechend, bevorzugt behandelt. Aus dem gleichen Grunde erscheint das Buch — einer Anregung des Verlages zufolge — in der Buchreihe „Chemie und Technologie der Kunststoffe in Einzeldarstellungen“.

Bei der Vielzahl und Verschiedenartigkeit der Isolierstoffe lag die Gefahr nahe, daß bei vollständiger Berücksichtigung aller Prüfverfahren, vor allem der nichtelektrischen, das Buch zu umfangreich geworden wäre. Die Verfasser haben sich daher darauf beschränkt, in erster Linie nur auf diejenigen Verfahren einzugehen, die für fast alle Isolierstoffe anwendbar sind, oder die nicht allgemein bekannt sind.

Nicht genügend ausgereifte Prüfverfahren, z. B. für Isolierlacke, oder Sonderprüfungen, z. B. für Mineralöle als Transformatorenöle, die im einschlägigen Schrifttum wiederholt beschrieben worden sind, wurden meist nicht berücksichtigt, um die systematische Darstellung nicht zu erschweren.

Wenn also bei der erstmaligen Bearbeitung manches lückenhaft geblieben ist und mancher Fachgenosse dieses oder jenes für sein engeres Arbeitsgebiet für ergänzungsbedürftig hält, so hoffen wir dennoch, daß die vorliegende erstmalig systematische Zusammenstellung sich nicht nur für die sinnvolle Durchführung von Isolierstoffprüfungen, sondern auch für den Ausbau der Verfahren und für die Schaffung internationaler Einheitsverfahren als brauchbar erweist.

Berlin, im August 1939.

**Rudolf Nitsche.**  
**Gerhard Pfestorf.**

# Inhaltsverzeichnis.

	Seite
<b>I. Die technisch wichtigen Isolierstoffe</b> . . . . .	1
A. Anorganische Isolierstoffe . . . . .	2
1. Naturstoffe . . . . .	2
2. Aus anorganischen Naturstoffen aufgebaute Isolierstoffe. . . . .	4
B. Organische Isolierstoffe . . . . .	5
1. Naturstoffe . . . . .	6
2. Von hochmolekularen Naturstoffen abgewandelte Isolierstoffe . . . . .	6
3. Aus niedrigmolekularen Naturstoffen aufgebaute Isolierstoffe . . . . .	9
a) Polykondensate. . . . .	9
b) Polymerisate . . . . .	11
C. Anwendungsformen . . . . .	13
D. Stoffbezeichnung . . . . .	13
<b>II. Prüfverfahren</b> . . . . .	14
A. Aufgaben und Grenzen der Prüfung . . . . .	14
B. Chemische Zusammensetzung . . . . .	17
1. Bedeutung der chemischen Analyse . . . . .	17
2. Analyse anorganischer Isolierstoffe . . . . .	18
3. Analyse organischer Isolierstoffe . . . . .	19
4. Gefügeuntersuchungen . . . . .	30
C. Verarbeitung (Formgebung). . . . .	35
1. Flüssige, filmbildende Isolierstoffe (Isolierlacke) . . . . .	35
2. Feste Isolierstoffe . . . . .	36
a) Spangebende Formung . . . . .	36
b) Spanlose Formung . . . . .	38
$\alpha$ ) Verfahren für Kautschuk und für nichthärtbare organische Kunststoffe . . . . .	38
$\beta$ ) Verfahren für härtbare Kunstharz-Preßmassen (Polykonden- sate) . . . . .	44
D. Physikalisches und chemisches Verhalten . . . . .	50
1. Prüfkörper . . . . .	50
a) Probenformen . . . . .	50
b) Herstellung . . . . .	52
c) Vorbehandlung vor der Prüfung . . . . .	57
d) Werkstoffprüfung oder Gebrauchsprüfung? . . . . .	57
2. Elektrische Prüfungen . . . . .	59
a) Allgemeines . . . . .	59
b) Prüfkörper . . . . .	60
c) Leitende Belegungen (Elektroden) . . . . .	61

	Seite
d) Elektrodenarten . . . . .	66
$\alpha$ ) Elektroden für die Bestimmung des dielektrischen Verlustfaktors, der Dielektrizitätskonstanten und des spezifischen Isolationswiderstandes . . . . .	66
$\beta$ ) Elektroden für die Bestimmung des Oberflächenwiderstandes . . . . .	67
$\gamma$ ) Elektroden für die Messung von Isolationswiderständen . . . . .	68
$\delta$ ) Elektroden für die Messung der Durchschlagsspannung oder für Spannungsprüfungen . . . . .	69
e) Elektrische Eigenschaften . . . . .	70
$\alpha$ ) Isolationswiderstand, Oberflächenwiderstand, spezifischer Oberflächenwiderstand . . . . .	70
$\beta$ ) Durchgangsspannung . . . . .	77
$\gamma$ ) Dielektrizitätskonstante, dielektrischer Verlustfaktor, spezifische Verlustleistung, Wechselstromwiderstand, Dämpfungszahl, logarithmisches Dämpfungsdekrement . . . . .	90
$\delta$ ) Durchschlagsspannung . . . . .	149
$\epsilon$ ) Lichtbogenfestigkeit . . . . .	159
$\eta$ ) Kriechstromfestigkeit . . . . .	160
f) Elektrische Eigenschaften unter besonderen Versuchsbedingungen . . . . .	161
g) Statistische Behandlung der Versuchsergebnisse . . . . .	167
3. Mechanische Prüfungen . . . . .	173
a) Maß und Gewicht . . . . .	173
b) Zugversuch . . . . .	176
c) Druckversuch . . . . .	186
$\alpha$ ) Druckfestigkeit . . . . .	186
$\beta$ ) Formänderung . . . . .	189
$\gamma$ ) Eindruckversuch (Kugeldruck-Härte) . . . . .	191
$\delta$ ) Spaltbarkeit . . . . .	194
d) Biegeversuch . . . . .	196
e) Verdrehversuch . . . . .	208
f) Schlagbiegeversuch . . . . .	209
g) Dauerversuche . . . . .	224
$\alpha$ ) Dauerversuche bei ruhender Belastung . . . . .	224
$\beta$ ) Dauerversuche bei wechselnder Beanspruchung . . . . .	225
4. Thermische Prüfungen . . . . .	228
a) Allgemeines . . . . .	228
b) Physikalische Konstanten. Wärmedehnzahl . . . . .	229
c) Technologische Prüfungen . . . . .	234
$\alpha$ ) Kurzfristige Prüfungen . . . . .	234
$\beta$ ) Wechselbeanspruchungen und langfristige Beanspruchungen durch Wärme . . . . .	250
5. Optische Prüfungen . . . . .	254
a) Lichtbrechung . . . . .	255
b) Optische Homogenität . . . . .	257
c) Lichtdurchlässigkeit . . . . .	257
d) Farbton . . . . .	259
e) Lichtbeständigkeit . . . . .	259
f) Optische Oberflächeneigenschaften . . . . .	259

	Seite
6. Chemische Prüfungen . . . . .	263
a) Allgemeines . . . . .	263
b) Wirkung von Wasser . . . . .	265
α) Wasseraufnahme . . . . .	266
β) Durchlässigkeit für Wasser und Wasserdampf . . . . .	272
γ) Verhalten gegen kochendes Wasser . . . . .	276
c) Beständigkeit gegen Chemikalien . . . . .	276
d) Wetterfestigkeit . . . . .	281
e) Alterung . . . . .	281
<b>III. Bewertung . . . . .</b>	<b>283</b>
A. Typisierung und Überwachung von Isolierpreßstoffen. . . . .	284
1. Grundsätze der Typisierung . . . . .	284
2. Durchführung der amtlichen Überwachung . . . . .	287
3. Verbindung zwischen Stoff- und Masse-Überwachung . . . . .	290
4. Anwendung und Wirkung der Überwachung . . . . .	290
B. Weitere Grundlagen für die Abnahme von Isolierstoffen . . . . .	291
C. Eigenschaftstabeln . . . . .	291
D. Umrechnungstabeln für physikalische und technische Einheiten . . . . .	310
<b>Sachverzeichnis . . . . .</b>	<b>315</b>

## **Druckfehlerberichtigung.**

Seite 71, Zeile 19 von oben: statt „das Vierfache“ lies „ein Viertel“



# I. Die technisch wichtigen Isolierstoffe.

Der Begriff „elektrotechnischer Isolierstoff“ wird bestimmt durch die Forderungen, die die Praxis an einen „Isolierstoff“ stellt. Der Elektrotechniker verlangt vor allem geringes *Leitvermögen* sowohl im Innern des Werkstoffes als auch an seiner Oberfläche, und zwar bei Gleichspannung wie auch bei Wechselfpannung, ferner möglichst geringen *Energieverlust* und schließlich bei höheren Spannungen ausreichende *Durchschlagsfestigkeit*. Diese Forderungen werden — allerdings mit beträchtlichen quantitativen Unterschieden — von allen Stoffen mit geringem Ionenleitvermögen erfüllt. So finden wir technisch brauchbare Isolierstoffe in fast allen Werkstoffgruppen mit Ausnahme der Metalle, bei denen das Leitvermögen sehr hoch ist.

Für eine zweckmäßige Prüfung und zuverlässige Bewertung eines Stoffes, der als elektrischer Isolierstoff verwendet werden soll, ist die Kenntnis der Isolierstoffe, ihrer Zusammensetzung, ihres Aufbaues, ihrer Verarbeitung und ihrer Beanspruchungen in der Praxis unbedingte Voraussetzung. Wenngleich es nicht Aufgabe des vorliegenden Buches ist, eine umfassende Kenntnis dieser Voraussetzungen zu vermitteln, so sei wenigstens ein kurzer Überblick über die wichtigsten Isolierstoffgruppen gegeben.

Im Hinblick auf die Bedürfnisse der Prüfung ist die Einteilung der Isolierstoffe nach chemischen Gesichtspunkten am zweckmäßigsten. Man unterscheidet die beiden Hauptgruppen:

A. Anorganische Isolierstoffe.

B. Organische Isolierstoffe (vgl. Tabelle 1).

Tabelle 1. Übersicht über die wichtigsten Isolierstoffe.

- |  |   |
|--|---|
| A. Anorganische Isolierstoffe                | B. Organische Isolierstoffe   |
| 1. Naturstoffe                               | 1. Naturstoffe  |
| a) Natur-Gesteine                            | a) Mineralöle   |
| b) Glimmer                                   | b) Organische Hilfs- oder Ausgangsstoffe (z. B. Pflanzenöle, Harze, Teere und Bitumina, Wachse, Faserstoffe, Holz, Kautschuk) |
| c) Asbest                                    | 2. Von hochmolekularen Naturstoffen abgewandelte Isolierstoffe  |
| d) Oxyde                                     | a) Gummi  |
| 2. Aus Naturstoffen aufgebaute Isolierstoffe | b) Zellulose-Abkömmlinge  |
| a) Gläser                                    | 3. Aus niedrigmolekularen Naturstoffen aufgebaute Isolierstoffe   |
| b) Keramische Isolierstoffe                  | a) Polykondensate   |
| c) Sonstige anorganische Isolierstoffe       | b) Polymerisate   |

## A. Anorganische Isolierstoffe.

Die anorganischen Isolierstoffe lassen sich einteilen in zwei Gruppen:

1. Naturstoffe.
2. Aus Naturstoffen aufgebaute Isolierstoffe.

Die *erste Gruppe* umfaßt Stoffe, die von Natur fertig vorgebildet sind und — abgesehen von Aufbereitungsverfahren — meist in der natürlichen Form als Isolierstoff Verwendung finden. Dazu gehören

- a) Natur-Gesteine,
- b) Glimmer,
- c) Asbest,
- d) Oxyde.

### 1. Naturstoffe.

a) Die **Natur-Gesteine** haben heute geringere Bedeutung als früher, da sie in zunehmendem Maße durch neuere Isolierstoffe (organische Kunststoffe), insbesondere durch organische Preßstoffe, ersetzt werden, die gegenüber den Natur-Gesteinen unter anderem den Vorteil des gleichmäßigeren Gefüges haben. Die bei Natur-Gesteinen vorhandenen Einschlüsse, die häufig leitend sind, und die Feuchtigkeitsempfindlichkeit (Rückgang des Widerstandes bei Marmor und Schiefer bis auf wenige  $M\Omega$ ) haben von jeher die Verwendung auf niedere Betriebsspannungen beschränkt (hauptsächlich Verwendung als Grundplatten für Apparate). Die Feuchtigkeitsempfindlichkeit zwingt meistens zur Anwendung eines Schutzanstriches (Lackierung von Schiefer) oder einer Oberflächenbehandlung durch Polieren (Marmor vorderseitig poliert, rückseitig Schutzanstrich).

Zu den wichtigsten als Isolierstoffe dienenden Natur-Gesteinen gehören *Marmor* und *Schiefer* und verwandte Gesteine (sog. belgischer Granit, Solnhofer Kalkstein u. ä.).

Bei der Prüfung ist vor allem auf die Inhomogenität des Gefüges zu achten. Man hat deshalb z. B. bei mechanischen Prüfungen größere Probenabmessungen als sonst üblich vorgesehen (vgl. S. 204, Biegefestigkeit).

b) **Glimmer** ist ein bergmännisch gewonnenes Naturprodukt. Von den zahlreichen Arten sind technisch wichtig:

*Muskowit-Glimmer* oder „*Kali-Glimmer*“ (Kalium-Aluminium-Hydro-Silikat  $K_2O \cdot 3 Al_2O_3 \cdot 6 SiO_2 \cdot 2 H_2O$ ), *Phlogopit-Glimmer* oder *Amber-Glimmer* oder „*Magnesia-Glimmer*“ (Kalium-Aluminium-Magnesium-Hydro-Silikat  $K_2O \cdot 3 Al_2O_3 \cdot 12 MgO \cdot 12 SiO_2 \cdot 2 H_2O$ ).

Charakteristisch für Glimmer sind leichte Spaltbarkeit bis zu sehr dünnen Blättern (bei Muskowit bis zu 0,006 mm), hohe Biegsamkeit der Blätter, hohe Temperaturbeständigkeit (bei Muskowit 500 bis 700° C, bei Phlogopit 800 bis 1000° C), Eigenschaften, die den Glimmer als Isolierstoff in der Elektrowärmetechnik bisher unersetzbar gemacht haben.

Je nach der Aufbereitung unterscheidet man:

*Roh- oder Blockglimmer* (Platten von 0,3 bis 4 mm Dicke), *Spaltglimmer* (aus Blockglimmer durch Spalten in dünne Blätter hergestellt), *Mikanit* (Spaltglimmerlagen, verbunden durch ein Bindemittel, z. B. Schellack).

In Anbetracht der Verwendung eines Bindemittels zur Herstellung von Mikanit gehört Mikanit — streng genommen — zur 2. Gruppe der anorganischen Isolierstoffe. Der Gehalt an Bindemittel ist jedoch meist sehr gering, so daß die Erwähnung der Mikanite in der 1. Gruppe gerechtfertigt ist. Man unterscheidet je nach Bindemittelmenge, Aufbau, Anwendung oder Formbarkeit

1. Kommutator-Mikanit (< 4% Bindemittel),
2. Heiz-Mikanit (< 3% Bindemittel),
3. Form-Mikanit (20—35% Bindemittel),
4. Hartform-Mikanit (10—20% Bindemittel),
5. Biege-Mikanit (< 30% Bindemittel).

Wird Biege-Mikanit, das meist in Dicken von 0,2 bis 0,5 mm hergestellt wird, mit Faserstoffschichten kombiniert, so gelangt man zu Mikanit-Papier (Biege-Mikanit, meist zweiseitig mit 0,03 mm dickem Seidenpapier bezogen),

Mikanit-Leinen (Mikanit, meist einseitig mit 0,15 mm Baumwollmull, auf der anderen Seite mit Seidenpapier bezogen),

Mikanit-Batist (Mikanit, auf einer Seite mit etwa 0,10 mm Baumwollbatist, auf der anderen mit Seidenpapier bezogen),

Mikanit-Seide (Mikanit mit Überzug aus reiner Seide).

Werden statt Biege-Mikanit Lagen dünnen Spaltglimmers mit Faserstoffschichten (fast ausschließlich einseitig) bedeckt, so werden je nach Faserstoffart unterschieden: Glimmer-Papier, Glimmer-Batist, Glimmer-Seide, Glimmer-Lacktuch, Glimmer-Asbest.

c) Der einzige in der Natur vorkommende Isolierstoff mit hoher Temperaturbeständigkeit und zugleich hoher Biegsamkeit und guter Verspinnbarkeit ist der *Asbest*, ein Magnesium-Silikat, das durch eine einzigartige faserige Struktur ausgezeichnet ist. Die verschiedenen Asbestsorten werden nach ihrem chemischen und mineralogischen Aufbau in zwei große Gruppen eingeteilt: die *Serpentin*-Asbeste und die *Hornblende*-Asbeste. Die *Serpentin*-Asbeste bestehen aus weichen, biegsamen, hellen Fasern mit verhältnismäßig gutem elektrischen Isolationsvermögen; chemisch sind sie wasserhaltige eisenfreie oder sehr eisenarme Magnesium-Silikate ( $3 \text{ MgO} \cdot 2 \text{ SiO}_2 \cdot 2 \text{ H}_2\text{O}$ ).

Dagegen sind die Hornblende-Asbeste wesentlich härter, holzwolleähnlich, durch häufig hohen Eisengehalt gelbgrau bis blau gefärbt und daher für elektrische Isolationszwecke weniger geeignet.

Obwohl auch Serpentin-Asbeste in Anbetracht einer beachtlichen Feuchtigkeitsaufnahme an sich für elektrische Isolierung nur bedingt

geeignet sind, sind sie auch heute noch neben Glasgespinst die einzigen brauchbaren Isolierstoffe für Heizdrähte in Heizkissen.

Für die Verwendung der Asbeste für diesen Zweck ist bei der Prüfung vor allem auf Reinheit des Asbestes — insbesondere Freiheit von leitenden oder korrodierenden Einschlüssen<sup>1</sup> — zu achten.

d) **Oxyde.** Unter den reinen *Oxyden* sind für die Elektrotechnik am wichtigsten das *Aluminiumoxyd*  $\text{Al}_2\text{O}_3$  in seiner Form als *Sinterkorund* und das *Magnesiumoxyd*  $\text{MgO}$ . Da beide Oxyde jedoch als Isolatoren nur in Sonderfällen Verwendung finden und hauptsächlich die Grundstoffe für die Einbettmassen in der Elektrowärmetechnik bilden, kann hier auf weitere Einzelheiten verzichtet werden.

Als Übergang zu den keramischen Isolierstoffen kann der Quarz ( $\text{SiO}_2$ ) betrachtet werden, der in der Form von *Quarzgut*, das ist aus reinem Quarzsand erschmolzenes Material mit mindestens 99,7%  $\text{SiO}_2$ , wie  $\text{MgO}$  und  $\text{Al}_2\text{O}_3$  für die Elektrowärmetechnik Bedeutung hat, zumal neben guten Isoliereigenschaften höchste Temperatur-Wechselbeständigkeit ihn auszeichnen. Soweit die Oxyde als Formkörper Verwendung finden, können die Prüfverfahren für keramische Isolierstoffe sinngemäß angewendet werden.

## 2. Aus anorganischen Naturstoffen aufgebaute Isolierstoffe.

Die 2. Gruppe der anorganischen Isolierstoffe ist gegenüber den Naturstoffen vielfach durch größere Gleichmäßigkeit des Gefüges und durch vielseitigere und bequemere Gestaltungsmöglichkeiten ausgezeichnet.

a) Das hierher gehörende **Glas**, besonders das bekannte Natron-Kalk-Silikat-Glas, wurde bisher als elektrischer Isolierstoff in Deutschland nur wenig angewendet, da bei steigenden Temperaturen das Isolationsvermögen stark abnimmt, und da Glas relativ empfindlich gegen Atmosphärien ist (oberflächliche Hydrolyse, Bildung von Wasserhäuten).

b) Dagegen haben sich die **keramischen Isolierstoffe**, Hartporzellan und Sondermassen, ein weites Feld erobert, besonders in der Hochfrequenz- und Elektrowärmetechnik. Einen guten Überblick über die keramischen Stoffe gibt die vom Verband Deutscher Elektrotechnischer Porzellanfabriken (VDEP) aufgestellte Übersichts- und Eigenschaftstabelle (siehe S. 292). Hiernach sind die Stoffe in Gruppen I bis V unterteilt.

Gruppe I umfaßt die bekannten *Hartporzellane* mit Tonsubstanz als überwiegendem Bestandteil.

Gruppe II die *magnesiumsilikathaltigen* Massen mit gemahlenem Speckstein oder Talkum als Hauptbestandteil (z. B. *Steatit*, *Calit*, *Frequenta*, Stoffe mit geringem Verlustwinkel, guter Maßhaltigkeit und Festigkeit),

<sup>1</sup> Vgl. SCHÜRMAN, E. u. W. ESCH: Z. Kautschuk Bd. 10 (1934) S. 101.

Gruppe III die *rutilhaltigen* Sondermassen, also hauptsächlich *titandioxyd*( $\text{TiO}_2$ -)haltige Massen (z. B. *Condensa*, *Kerajar*, ausgezeichnet durch sehr hohe Dielektrizitätskonstante und negativem Temperaturkoeffizienten der Dielektrizitätskonstanten),

Gruppe IV *ton-* bzw. *specksteinhaltige* Massen mit sehr kleiner Wärmedehnzahl,

Gruppe V *ton-* oder *magnesiumsilikathaltige* poröse Massen mit verschiedenen Zusätzen für Elektrowärmetechnik, ausgezeichnet durch große Hitzebeständigkeit.

Für die Anwendung dieser Stoffgruppen sei auf Tabellen 27 bis 31 (S. 292) verwiesen.

Allen keramischen Stoffen gemeinsam ist ihre Formgebung im plastischen Zustand. Die plastische Masse, die die Ausgangsbestandteile enthält, wird durch Drehen, Gießen, Naß- oder Trockenpressen oder Strangpressen geformt. Dieser Vorgang der Formgebung ist rein physikalisch, also ohne stoffliche Änderung. Nach der Formgebung werden die Formkörper z. B. aus Massen der Gruppe I (Hartporzellane) getrocknet, glasiert und bei  $1400^\circ$  gebrannt. Dieser Vorgang des Trocknens und Brennens ist mit physikalisch-chemischen und chemischen, also stofflichen Änderungen verbunden und äußert sich unter anderem in großen Schwindungen (bis zu 20%!) des Formkörpers. Art der Formgebung (z. B. Drehen oder Naßpressen) und vor allem Art des Trocknens und Brennens wirkt naturgemäß sehr stark auf die Eigenschaften des fertigen keramischen „Werkstoffes“. Außerdem sind die Eigenschaften gestaltabhängig. Daher sind die an gesondert hergestellten Prüfkörpern ermittelten Eigenschaften nicht ohne weiteres auf anders gestaltete Formkörper übertragbar. Voraussetzung dazu ist zunächst mindestens genaue Kenntnis der Herstellungsbedingungen und der Zusammensetzung.

c) **Sonstige anorganische Isolierstoffe.** Der in der „Typisierung der gummfreien Isolierpreßstoffe“ (Tabelle 26, S. 285) aufgeführte *Typ Y (Mycalex)* besteht aus Bleiborat mit Glimmer, wird im Warmpreßverfahren bei hoher Temperatur ( $> 600^\circ$ ) geformt und hat neben sehr guten elektrischen Eigenschaften auch bemerkenswert gute mechanische und thermische Eigenschaften.

*Typ X* besteht aus Zement oder Wasserglas mit anorganischen Füllstoffen, z. B. Asbest, und wird im Kaltpreßverfahren verarbeitet. Er zeichnet sich durch hohe Feuerfestigkeit aus, gehört aber nicht zu den eigentlichen Isolierstoffen.

## B. Organische Isolierstoffe.

Die organischen Isolierstoffe lassen sich in drei Gruppen einteilen:

1. Naturstoffe,
2. von hochmolekularen Naturstoffen abgewandelte Isolierstoffe,
3. aus niedrigmolekularen Naturstoffen aufgebaute Isolierstoffe.

Die beiden letzten Gruppen umfassen ein wichtiges und vielseitiges Gebiet der Isolierstoffe, nämlich das Gebiet der *Kunststoffe*.

### 1. Naturstoffe.

Die erste Gruppe der *Naturstoffe* enthält nur wenige Stoffe, die als Isolierstoff Bedeutung haben, sofern nur *die* Stoffe berücksichtigt werden, die bei der Aufbereitung und Reinigung nur physikalische aber keine tiefgreifenden chemischen Änderungen durchgemacht haben.

Zu diesen Stoffen sind in erster Linie die *Mineralöle* zu rechnen, d. h. Kohlenwasserstoff-Gemische verschiedener Zähflüssigkeit, die als Transformatorenöle, Schalteröle, Kabelöle und neuerdings auch im Kondensatorenbau weitgehende Verwendung finden. Für die Prüfung der Mineralöle als Isolierstoff gelten im allgemeinen die bekannten physikalischen und chemischen Ölprüfverfahren<sup>1</sup>, so daß diese Verfahren im folgenden nicht näher behandelt worden sind. Wohl am stärksten zu beachten bei der Prüfung der Mineralöle sind die Alterungsprüfverfahren, da die Alterung auch bei den Mineralölen als organische Stoffe in Anbetracht der meist hohen Betriebstemperaturen starke stoffliche Änderungen und damit entsprechende Eigenschaftsänderungen bewirken kann.

Die in der Isolierstofftechnik viel verwendeten weiteren Naturstoffe wie *Pflanzenöle* (*Leinöl, Holzöl*), *Harze* (*Kolophonium, Kopale, Schellack, Bernstein*), *Bitumina* (*Asphalte*), *Teere* (*Peche*), *Wachse, Faserstoffe* (*Seide, Leinen, Jute, Baumwolle*), *Kautschuk, Guttapercha, Balata* werden fast ausschließlich nicht in ihrer ursprünglichen Form, sondern meist nur in Gemischen oder nach weitgehender chemischer Umwandlung (s. folgende Gruppe) als elektrische Isolierstoffe benutzt. Sie haben daher den Charakter von Rohstoffen, zum Teil von Hilfsstoffen. Auch *Holz* hat den Charakter eines Hilfsstoffes, da es im Naturzustand wegen seines Gehaltes an Wasser und Salzen als Isolierstoff ungeeignet ist; für seine Verwendung als Isolierstoff ist daher unter anderem eine geeignete Imprägnierung notwendig.

Unter den in Form von Gemischen verarbeiteten Naturstoffen spielen auch heute noch die aus Teer oder Bitumen mit anorganischen Füllstoffen, z. B. Asbest, hergestellten Isolierpreßstoffe des *Types 7* und *8* (Tabelle 26, S. 285) eine beachtliche Rolle, da sie sich bequem formen lassen (Warmpressen), sehr unempfindlich gegen Wasser und billig sind.

### 2. Von hochmolekularen Naturstoffen abgewandelte Isolierstoffe.

a) Zu den Isolierstoffen, die aus hochmolekularen Naturstoffen hergestellt werden, gehören in erster Linie die verschiedenen **Gummisorten**,

<sup>1</sup> Vgl. unter anderem: Ölbewirtschaftung, 2. Aufl. Berlin: Julius Springer 1937. — Ferner: Isolieröle. Berlin: Julius Springer 1938.

die aus dem Naturkautschuk durch Vulkanisation, d. h. durch Anlagerung von Schwefel, gewonnen werden. Mit wachsendem Schwefelgehalt steigt unter anderem die Härte, so daß je nach dem Gehalt an Schwefel zwischen

*Weichgummi* und *Hartgummi*

unterschieden wird. Fast stets werden bei der Gummierstellung Füllmittel zur Erzielung bestimmter Eigenschaften zugesetzt, bei Weichgummi außerdem Alterungsschutzmittel.

Kennzeichen der für die Elektrotechnik brauchbaren Gummisorten sind die guten elektrischen *und* elastischen Eigenschaften, so daß auch heute noch Weichgummi in der Leitungstechnik ein wichtiger Isolierstoff ist. Hartgummi ist dagegen in der Verwendung zugunsten der Kunstharz-Preßstoffe stark zurückgegangen.

Die Art und Aufbereitung des Naturkautschuks und Art der Füllstoffe, Mischungsverfahren und -bedingungen, Vulkanisationsbedingungen usw. beeinflussen die Eigenschaften der Vulkanisate, so daß die Kenntnis der Vorgeschichte der Vulkanisate für die zuverlässige und erschöpfende Auswertung der Prüfergebnisse Voraussetzung ist. Bei der Prüfung am wichtigsten ist bei Weichgummi-Erzeugnissen die Berücksichtigung der Alterung, die gerade bei diesem Werkstoff stark ausgeprägt sein kann und unter Umständen zum Brüchig- oder Klebrigwerden führen kann<sup>1</sup>.

b) Wachsende Bedeutung haben die **Zelluloseabkömmlinge** in der Elektrotechnik erlangt. Das älteste und bekannteste Erzeugnis ist das *Papier*, das — imprägniert oder unimprägniert — wichtiger Isolierstoff in der Kabeltechnik ist, als *Preßspan* (*Tafel-* oder *Rollenpreßspan*) unter anderem im Transformatorenbau und in Verbindung mit Kunstharz als *Hartpapier* vielseitig als Isolier- und Baustoff verwendet wird.

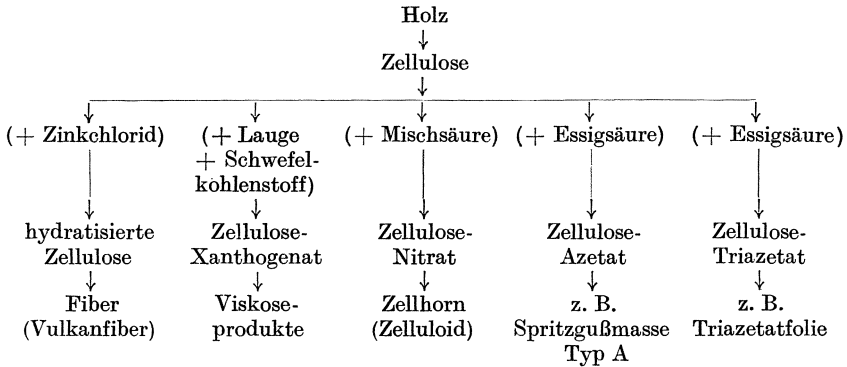
Durch chemische Behandlung der Zellulose entsteht eine Reihe zum Teil wertvoller Isolierstoffe (vgl. Tabelle 2).

Bei Einwirkung gewisser Salze oder Säuren wird die Zellstoff-Faser unter starker Quellung hydratisiert, wird dabei weich und schleimig und läßt sich in diesem Zustand zu einer fast homogenen Masse umwandeln. So wird *Fiber* (*Vulkanfiber* und *Leatheroid*) aus Zellstoff (Papierbahnen) durch Einwirkung von Zinkchloridlösungen oder Schwefelsäure erzeugt.

Fiber neigt zur Feuchtigkeitsaufnahme und kann Korrosionen begünstigen, besonders dann, wenn die bei der Herstellung verwendeten sauren Anteile nicht restlos ausgewaschen wurden. Für Zwecke der

<sup>1</sup> Ausführliche Angaben über Gummi unter anderem in E. A. HAUSER: Handbuch der gesamten Kautschuktechnologie. Berlin: Union Deutsche Verlagsgesellschaft 1935; MEMMLER: Handbuch der Kautschukwissenschaft. Leipzig: S. Hirzel 1930.

Tabelle 2. Isolierstoffe (Kunststoffe) auf Zellulosegrundlage.



Starkstrom- und Fernmeldetechnik ist Fiber als Isolierstoff daher nur dann geeignet, wenn Schutz gegen Feuchtigkeit vorhanden ist. Man beschränkt die Verwendung von Fiber auf die Fälle, wo Fiber wegen ihrer günstigen mechanischen Eigenschaften durch andere Isolierstoffe nicht zu ersetzen ist.

Durch Nitrieren von Zellulose (Einwirkung von Salpetersäure) gelangt man zu dem heute nur noch wenig verwendeten *Zellulose-Nitrat*, das in Verbindung mit Kampfer als *Zelluloid* oder *Zellhorn* bekannt ist. Durch Zusatz von Gips erhält man ein wenig brennbares Zellulose-Nitrat, das als Spritzmasse Anwendung fand (früher Typ N; Handelsname: *Trolit F*).

Durch Azetylieren von Zellulose (Einwirkung von Essigsäure) entstehen *Zellulose-Azetate*. Unter diesen ist das *Zellulose-Triazetat* in jüngster Zeit als Kabelisolierfolie und Isolierseide zu praktischer Bedeutung gelangt<sup>1</sup>, da dieser Isolierstoff neben guten elektrischen Eigenschaften innerhalb gewisser Temperaturgrenzen beachtliche Unempfindlichkeit der Eigenschaften gegenüber der Temperatur aufweist.

Seit langem bekannt ist das *Zellulose-Hydroazetat*, das ohne oder mit Füllstoffen als Spritzgußmasse zur Herstellung von Spritzteilen — vor allem in der Fernmeldetechnik — viel verwendet wird, und in der „Typisierung der gummitreien Isolierpreßstoffe“ (Tabelle 26, S. 285) als *Typ A* geführt wird. (Handelsname: *Trolit W*). Dieser Stoff zeichnet sich besonders durch seine leichte Verarbeitbarkeit (Spritzguß) aus.

Wachsende Bedeutung gewinnen als Isolierstoffe auch Zellulose-Äther, z. B. *Äthyl-* und *Benzylzellulosen*, die gegenüber den anderen Zellulose-abkömmlingen unter anderem größere Wärmebeständigkeit aufweisen.

<sup>1</sup> NOWAK, P. u. H. HOFMEIER: *Kunststoffe* Bd. 27 (1937) S. 1. — PFESTORF, G. u. W. HETZEL: *Kunststoffe* Bd. 28 (1938) S. 144. — Meßergebnisse der P. T. R. in Firmen-Mitteilung Zellulose-Triazetatprodukte Schering, Erzeugnisse der Zellulose-Forschungsgemeinschaft Schering AG. u. C. F. Boehringer & Söhne G.m.b.H.



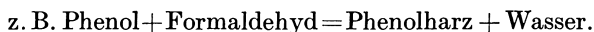
### 3. Aus niedrigmolekularen Naturstoffen aufgebaute Isolierstoffe.

Die wichtigste und bedeutungsvollste Gruppe innerhalb der organischen Isolierstoffe sind zweifellos die *aus niedrigmolekularen Naturstoffen aufgebauten Isolierstoffe*. Zu ihnen gehört unter anderem die Mehrzahl der bekannten, in der „Typisierung“ (Tabelle 26, S. 285) zusammengefaßten, *nichtkeramischen, gummifreien Isolierpreßstoffe*. Bei der Gruppe handelt es sich meist um Stoffe, die aus plastischen Massen sehr leicht und bequem beliebig und maßhaltig geformt werden können. Diese Tatsache der leichten Formgebung durch Pressen, Spritzen oder Preßspritzen in Verbindung mit guten, zum Teil sehr guten elektrischen und mechanischen Eigenschaften hat die Anwendung dieser Stoffe in der Elektrotechnik sehr rasch gefördert und stark zur Entwicklung der Stoffe beigetragen.

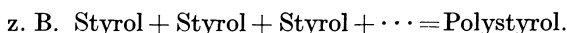
Man unterteilt die Gruppe zweckmäßig nach chemischen Gesichtspunkten in

- a) Polykondensate,
- b) Polymerisate.

Polykondensate entstehen aus zwei verschiedenartigen niedrigmolekularen Ausgangsstoffen, die sich unter Austritt eines Reaktionsproduktes, meist Wasser, zu einem hochmolekularen Stoff vereinigen,



Polymerisate entstehen aus niedrigmolekularen, ungesättigten Verbindungen; die kleinen Moleküle der ungesättigten „monomeren“ Verbindung werden durch Aktivierung zu großen Molekülen, zum „Polymerisat“ miteinander verkettet,



#### a) Polykondensate.

Unter den Polykondensaten sind zur Zeit die wichtigsten:

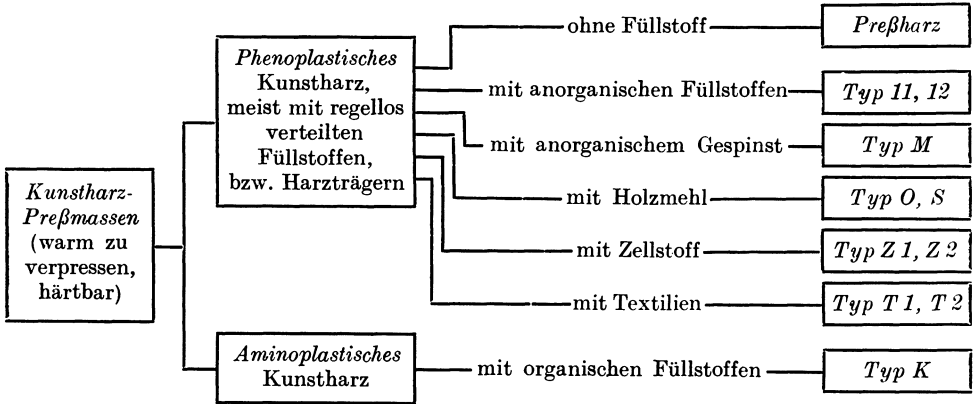
die Phenol-Formaldehyd-Kondensate, kurz „*Phenoplaste*“ genannt, die Harnstoff-Formaldehyd-Kondensate und deren Abkömmlinge, kurz „*Aminoplaste*“ genannt.

Polykondensate können je nach den Herstellungsbedingungen härtbar oder nichthärtbar sein. Als Isolierstoff sind die härtbaren Polykondensate von technischer Bedeutung. Die härtbaren Kondensate oder „*härtbaren Kunstharze*“ haben die wichtige Eigenschaft, daß sie in der Wärme unter Druck zunächst erweichen, also leicht formbar sind. Gleichzeitig aber setzt eine chemische Umwandlung ein (fortschreitende Polykondensation), die zur Erhärtung und damit zu einem fast unlöslichen und nicht wieder erweichbaren Produkt führt (Abb. 1, S. 11). Die Eigenschaften des Enderzeugnisses hängen in starkem Maße u. a. vom

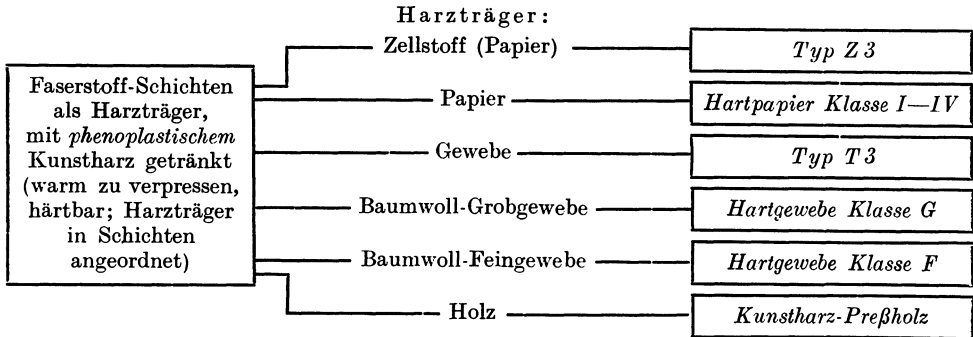
Tabelle 3. Aufbau und Einteilung der warmgepreßten Kunstharz-Preßstoffe aus härtbaren Kunstharzen.

**A. Nichtgeschichtete Kunstharz-Preßstoffe**

(vorwiegend als Fertig-Erzeugnisse in geschlossenen Formen hergestellt).

**B. Geschichtete Kunstharz-Preßstoffe**

(abgesehen von Typ Z 3, T 3 vorwiegend als Halbzeug: Platten, Stangen, Rohre).



Grad der Härtung, also von der Dauer der Wärmeeinwirkung und von der Temperatur bei der Formgebung (Pressen) sowie vom Druck beim Pressen ab.

Im übrigen können die Eigenschaften noch sehr stark beeinflusst werden durch *Füllstoffe* oder *Harzträger*. Eine Übersicht über die zur Zeit wichtigsten warmgepreßten Kunstharzpreßstoffe gibt Tabelle 3, aus der auch die gebräuchlichen Füllstoffe bzw. Harzträger ersichtlich sind.

Außer den härtbaren warmgepreßten Kondensaten aus Phenolen oder Harnstoff bzw. Thioharnstoff und Formaldehyd sind als Isolierstoffe auch die Kondensate aus Phenolen und Furfurol, sowie aus Anilin und Formaldehyd, ferner — hauptsächlich als Lackbindemittel — aus Phthalsäure und Glycerin (kurz „*Glyptalharz*“ genannt) von Interesse.

Die Verarbeitung (Formgebung) fast aller Kondensate erfolgt mit oder ohne Füllstoffe bzw. Harzträger vorzugsweise im Warmpreßverfahren, während die Verarbeitung der Polymerisate vorzugsweise im Spritzgußverfahren erfolgt.

Die Formgebung der Kondensate ist nicht nur ein physikalischer sondern auch ein chemischer Vorgang (Härtung), der erhebliche stoffliche Änderungen bewirkt und unter anderem auch — meist nur geringe — Schwindungen (bis zu 1,0%) verursacht. Wird während der Formgebung die chemische Umwandlung nicht bis zum vollständig ausgehärteten

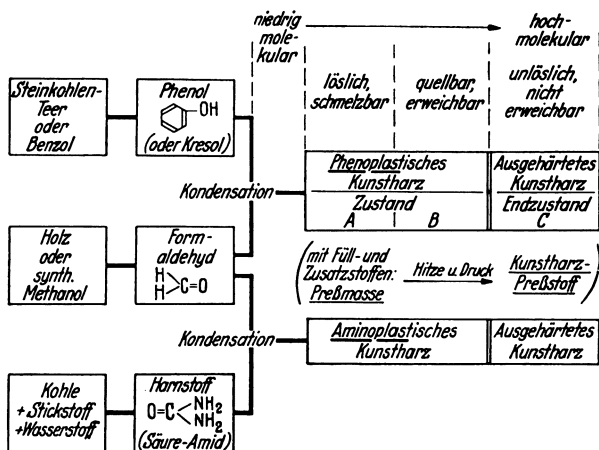


Abb. 1. Schema der Herstellung von Pheno- und Aminoplasten.

Erzeugnis zu Ende geführt, so treten an solchen Erzeugnissen im Laufe der Zeit Schrumpfungen und Eigenschaftsänderungen auf, die auf Nachhärtung — also Fortgang der chemischen Umwandlung — zurückzuführen sind. Bei der Prüfung von Erzeugnissen aus Kunstharz-Preßstoffen ist daher Kenntnis des chemischen Zustandes Voraussetzung zur zuverlässigen Beurteilung.

## b) Polymerisate.

Während die meisten für die Elektrotechnik brauchbaren Polykondensate nach der Formgebung nicht wieder erweichbar und kaum löslich sind, sind die meisten Polymerisate wieder erweichbar und in bestimmten Lösungsmitteln auch nach der Formgebung löslich. Da der Erweichungspunkt meist unter  $100^\circ$  liegt, ist die Anwendung begrenzt trotz der vielfach vorzüglichen elektrischen Eigenschaften.

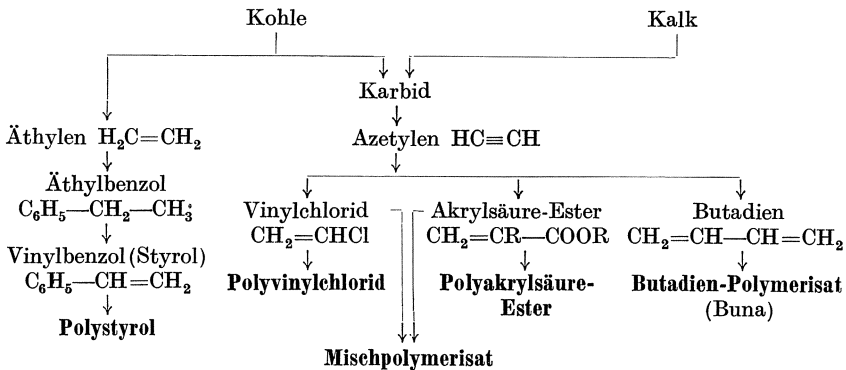
Zu den elektrotechnisch brauchbaren Polymerisaten gehören: *Polystyrol (Trolitul)*, *Polyvinylchlorid (Igelit oder Mipolam PCU)*, *nachchloriertes Polyvinylchlorid (Igelit PC u. a. als Kabelisolierfolie: Vinifol)*

*Mischpolymerisat*, gewonnen durch gemeinsames Polymerisieren von Vinylchlorid und Akrylsäureester (*Mipolam MP*), *Polyakrylsäure-Ester* und *Polymethakrylsäure-Methylester* (*Plexigum*), *Butadien-Polymerisate* (*Buna*).

Da alle diese Produkte das chemische Radikal,  $-\text{CH}=\text{CH}_2$ , die *Vinyl*-gruppe, als wichtigsten Grundbaustein enthalten, spricht man zusammenfassend von *Polyvinylverbindungen* (vgl. Tabelle 4).

Unter diesen Verbindungen nehmen die verschiedenen Butadien-Polymerisate (*Kunstkautschuk*-Sorten; Handelsname: *Buna*) eine Sonderstellung ein, da sie zum Unterschied von den übrigen aufgeführten Polymerisaten *vulkanisierbar* sind, d. h. wie Naturkautschuk u. a. Schwefel anlagern können unter erheblicher Verbesserung der thermischen Eigenschaften; je nach Schwefelmenge erhält man weichgummi- oder hartgummiartige Erzeugnisse.

Tabelle 4. Kunststoffe auf Vinylgrundlage (Polyvinylverbindungen).



Außer den in Tabelle 4 aufgeführten Stoffen wird als gummiähnlicher nichthärter Kunststoff *Polyisobutylen* (*Oppanol*) verarbeitet. Verwandt mit Polystyrol ist *Polyvinyl-Carbazol* (*Luvican*), das sich durch verhältnismäßig hohe Wärmefestigkeit auszeichnet.

Bei den Polymerisaten ist die Formgebung zwar überwiegend ein physikalischer Vorgang. Doch ist zu berücksichtigen, daß die Formgebung (meist durch Spritzen) bei Temperaturen erfolgt, die über der Erweichungs-, zuweilen auch über der Zersetzungstemperatur liegen, und daß die kettenförmigen Makromoleküle beim Formen in den Werkzeugen sich in Fließrichtung orientieren. So können durch scheinbar geringe Änderungen beim Formen Erzeugnisse mit oft beträchtlichen Eigenschaftsunterschieden erhalten werden. Auch bei den Polymerisaten ist daher zur Auswertung von Ergebnissen gründliche Kenntnis der Zusammensetzung und der Verarbeitungsbedingungen notwendig.

### C. Anwendungsformen.

Ebenso vielartig wie der chemische Aufbau sind die *Anwendungsformen* der Isolierstoffe. Abgesehen von den gasförmigen Stoffen (z. B. Luft, Edelgase) und flüssigen Stoffen, wie z. B. Transformatorenöle, können viele der festen Isolierstoffe in den verschiedensten Formen angewandt werden, z. B. in Form von Imprägniermitteln (gelöst in geeigneten Lösungsmitteln), filmbildenden Anstrichmitteln (mit Lösungs- und Verdünnungsmitteln), Halbzeugen (Gespinnste, Bänder, Folien, Platten, Stangen, Rohre), Fertigerzeugnissen (in Formen hergestellte Isolierteile).

Die außerordentliche Mannigfaltigkeit der Isolierstoffe und ihrer Anwendungsformen bedingt entsprechende Vielseitigkeit der Prüfung und der Prüfverfahren, da Stoff und Form stärksten Einfluß auf die Eigenschaften und damit auch auf die Prüfungsart haben. Als Beispiel sei Glas in Form einer Platte und in Form feinen Gespinnstes angeführt, um diesen Einfluß aufzuzeigen.

### D. Stoffbezeichnung.

Die Vielzahl der Isolierstoffe hat — insbesondere seit der zunehmenden Bedeutung der organischen Kunststoffe — zu Gefahren geführt durch Fehlanwendungen, die unter anderem häufig auf nicht eindeutige Stoffbezeichnungen zurückzuführen sind. Gerade bei den neuen Isolierstoffen steht meistens die nichtssagende Handelsbezeichnung im Vordergrund an Stelle einer klaren, eindeutigen, chemischen oder neutralen Stoffbezeichnung.

Als neutrale Stoffbezeichnung haben sich für organische Isolierstoffe die Typbezeichnungen im Inland bewährt (vgl. S. 285). Diese Bezeichnungen haben aber den Nachteil, daß sie international nicht verständlich sind, zumal andere Länder ihre eigenen andersartigen Stoff-Kurzzeichen eingeführt haben. International verständliche Stoffbezeichnungen liegen bereits seit Jahren in der *Dezimal-Klassifikation* (DK) vor, die vom Internationalen Bibliographischen Institut in Brüssel herausgegeben und deren deutsche Fassung vom Deutschen Normenausschuß bearbeitet wird. Die DK ist eine systematische Einteilung des gesamten menschlichen Wissens. Sie teilt es in 10 Hauptgruppen 0 bis 9, von denen jede wieder in 10 Gruppen unterteilt wird, und so fort. Die Isolierstoffe sind im Abschnitt

621.3 Elektrotechnik

unter der Bezeichnung

621.315.61 Isolierstoffe

aufgeführt<sup>1</sup> und folgendermaßen unterteilt:

<sup>1</sup> Vgl. Vollständige Teilausgabe der Dezimal-Klassifikation 621.3 Elektrotechnik, 1931. Beuth-Verlag G. m. b. H., Berlin SW 19.

- 621.315.612 Keramische und ähnliche Stoffe. Porzellan. Glas. Emaille
- .613 Natürliche (mineralische) Stoffe
  - .1 Glimmer und Glimmererzeugnisse
  - .4 Schiefer
  - .5 Marmor
  - .6 Schwefel
  - .7 Quarz
  - .9 Sonstige isolierende Mineralien
- .614 Textil- und Faserstoffe
  - .1 Fiber
  - .4 Holz und Kork
  - .5 Leder
  - .6 Papier, Hartpapier, Preßspan usw.
  - .7 Textilfasern (Baumwolle, Seide usw.)
- .615 Isolierende Flüssigkeiten
  - .2 Mineralöle. Transformatorenöle
  - .9 Tetrachlor-Kohlenstoff u. a.
- .616 Plastische Massen, Kunststoffe
  - .1 Gummi
  - .4 Ebonit
  - .5 Verschiedene vegetabilische Gummiarten
  - .51 Guttapercha
  - .52 Balata
  - .7 Künstliche und regenerierte Gummiarten
  - .9 Verschiedene Plastische Massen
  - .92 Zellosederivate
  - .96 Künstliche Harze
- .617 Getrocknete Flüssigkeiten als Isolierstoffe
  - .1 Anstrich
  - .2 Trocknende Öle
  - .3 Firnis
  - .4 Lacke
- .618 Gasförmige Isolierstoffe
  - .2 Luft
  - .3 Stickstoff
  - .4 Kohlensäure
  - .9 Sonstige Gase

Durch die starke Entwicklung der organischen Kunststoffe ist diese Klassifikation stark ergänzungsbedürftig, soll sie der Aufgabe, brauchbares internationales Verständigungsmittel zu sein, gerecht werden.

## II. Prüfverfahren.

### A. Aufgaben und Grenzen der Prüfung.

Die Anwendungsmöglichkeiten der Isolierstoffe in der Elektrotechnik sind stark gestiegen, seitdem die festen Isolierstoffe in zunehmendem Maße die Aufgabe zugewiesen bekommen haben, nicht nur zu isolieren, sondern auch zu tragen, d. h. als Konstruktionselement zu dienen. Die vielseitigen Anwendungen bedingen genaue Kenntnis der Eigenschaften, soll der Isolierstoff betriebssicher verwendet werden. Die Kenntnis der

Eigenschaften soll uns die Prüfung vermitteln. Die Prüfverfahren müssen uns also instand setzen, so zu prüfen, daß die Ergebnisse eine sichere Voraussage über die Bewährung bei einem bestimmten Anwendungszweck zulassen. Denn man muß stets bedenken, daß es nur wenige absolute Werkstoffeigenschaften gibt<sup>1</sup>, die unabhängig von der Art des Prüfverfahrens ermittelt werden können. So können z. B.

chemische Zusammensetzung,

Vorgeschichte, d. h. Beanspruchung des Stoffes von der Herstellung bis zur Prüfung und die damit verbundene stoffliche Änderung,

Art und Geschwindigkeit der Beanspruchung bei der Prüfung,

klimatische Bedingungen bei der Prüfung (vor allem Temperatur),

Größe und Form des Prüfkörpers so stark bestimmend sein, daß geringe Änderungen dieser Faktoren erhebliche Änderungen im Ergebnis zur Folge haben.

Haben z. B. zwei Stoffe an einem genormten Prüfkörper die gleiche bei Normaltemperatur ermittelte Biegefestigkeit, so ändert sich mit der Temperatur

die Festigkeit keineswegs bei den beiden Stoffen gleichartig; sie kann mit steigender Temperatur bei dem ersten Stoff fallen, bei dem zweiten gleichbleiben. Bei höheren Temperaturen würde der erste Stoff sich bei Biegebeanspruchung also günstiger verhalten als der zweite, während nach der Eigenschaftstafel beide Stoffe gleichwertig wären (Beispiel: Typ T 2 gegenüber Typ S und K in Abb. 2). Ebenso verschiedenartigen Verlauf können die Festigkeiten nehmen bei Einflüssen wie Feuchtigkeit, Gestalt (Art der Formgebung), ferner bei dynamischer Beanspruchung (z. B. bei Änderung der Schlaggeschwindigkeit und -masse).

Will man daher ein zuverlässiges Bild über die voraussichtliche praktische Bewährung eines Isolierstoffes für bestimmte Anwendungszwecke erhalten, so wird man ohne sehr umfangreiche Versuchsreihen nicht auskommen. Notwendig ist zur umfassenden Erkenntnis

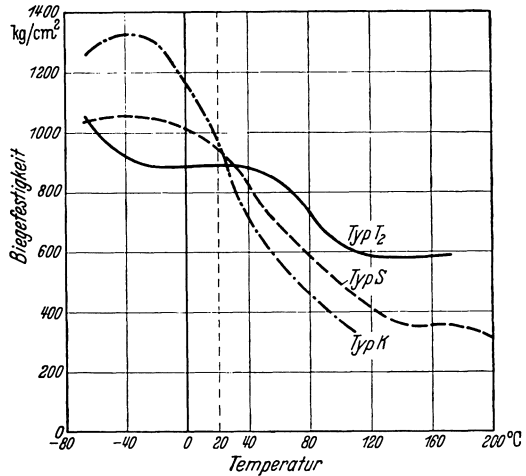


Abb. 2. Biegefestigkeit von Isolierpreßstoffen (Typ S, T 2, K) in Abhängigkeit von der Temperatur. (Aus Z. Kunststoffe 1939.)

<sup>1</sup> ШОУВ, А.: Gegen die Einpunktmethode. Z. plast. Massen Bd. 7 (1937) S. 144.

1. Prüfung des Ausgangsstoffes, z. B. bei den Kunstharz-Preßstoffen Prüfung der Preßmasse.

2. Prüfung des Isolierstoffes am Normalkörper, ferner an Versuchskörpern, die vom Normalkörper abweichende Gestalt besitzen und somit vom Normalkörper abweichende Herstellung verlangen, und schließlich an beliebig gestalteten Fertigstücken<sup>1</sup>.

3. Prüfung des Bau- oder Geräteteiles unter betriebsmäßigen Beanspruchungen.

Ein derartiges Versuchsprogramm, bei dessen Durchführung auch die Einflüsse der Temperatur, Feuchtigkeit, gegebenenfalls auch von Chemikalien usw. mit erfaßt werden müßten — also Prüfung der Eigenschaften nicht in *einem* Zustand, sondern in mehreren Stoffzuständen —, erfordert naturgemäß sehr viel Zeit und Kosten. Denn die Versuche müßten auch über ausreichend lange Zeiträume durchgeführt werden und können z. B. beim Beobachten des Einflusses von Feuchtigkeit mitunter jahrelang dauern, ehe der Endzustand erreicht ist. Jede Abkürzung der Versuchsdauer durch Verschärfung der Versuchsbedingungen kann zu falscher Beurteilung des Stoffes führen.

Bei neuentwickelten Isolierstoffen, über welche noch keine praktischen Erfahrungen vorliegen, wird man den mühseligen, zeitraubenden Weg der umfassenden Prüfung unbedingt gehen müssen, sofern man dem Anwender zuverlässige Voraussagen über die Eignung des Neustoffes machen will.

Bei den bereits bekannten, auf vielen Anwendungsgebieten bewährten Isolierstoffen läßt sich jedoch die Prüfung ganz erheblich einfacher gestalten. Bei diesen Stoffen genügt es, durch Prüfung die Gleichmäßigkeit des Stoffes innerhalb der gleichen Werkstofflieferung und die Übereinstimmung neuer Lieferungen mit früheren Lieferungen, also die Gleichmäßigkeit verschiedener Lieferungen festzustellen. Für eine solche Prüfung genügt die Prüfung des Stoffes auf chemische Zusammensetzung *und* auf einige „typische“ Eigenschaften. Damit erfüllt die Werkstoffprüfung auch ihre eigentliche, wesentliche Aufgabe. Denn die Werkstoffprüfung soll und kann ihr Ziel nicht darin sehen, dem Hersteller möglichst günstige Eigenschaftswerte zu vermitteln, die für die Praxis zuweilen wenig oder gar keine Bedeutung haben, sondern sie soll vor allem ein Mittel zur Beurteilung der Gleichmäßigkeit eines bereits in der Praxis bewährten Stoffes sein<sup>2</sup>. Nach DAEVES waren „ursprünglich die Kurzprüfungszahlen ein Kennzeichen für die Gleichmäßigkeit des Werkstoffes und nicht mehr. Später setzte dann aber eine Entwicklung ein, die vom kaufmännischen Standpunkt verständlich, vom Standpunkt des Ingenieurs jedoch sehr merkwürdig erscheint: Die Höhe der bei den Kurzprüfungen ermittelten Zahlen sollte nun ein Maß für die praktische

<sup>1</sup> NITSCHKE, R.: Z. VDI Bd. 8 (1936) S. 755.

<sup>2</sup> Vgl. Vortrag von DAEVES, K.: Auszug in Chem. Fabrik Bd. 9 (1936) S. 53.



Brauchbarkeit sein. So multiplizierte man beispielsweise die Bruchlast mit der Dehnung und bezeichnete das Produkt stolz als Qualitätsziffer. Man machte sich aber nicht die Mühe, festzustellen, ob wirklich die Höhe der ermittelten Zahlen in einer Beziehung zur praktischen Bewährung stand. In vielen Fällen ist nicht einmal eine gedankliche Beziehung vorhanden.“

Man muß also stets berücksichtigen, daß ein Prüfergebnis zunächst nur für den untersuchten Prüfkörper und nur für die bei der Prüfung vorliegenden Bedingungen Gültigkeit hat. Eine Übertragung des Ergebnisses auf anders gelagerte Verhältnisse ist erst dann zulässig, wenn zusätzliche Prüfungen unter entsprechenden andersartigen Bedingungen mit gleichem oder gleichartigem Ergebnis durchgeführt wurden.

Wenn Prüfverfahren vereinheitlicht oder genormt sind, so bedeutet dies zunächst nur, daß beim Arbeiten nach diesem Verfahren an verschiedenen Prüfstellen am gleichen Isolierstoff gleiche Ergebnisse erzielt werden; es bedeutet aber nicht, daß mit einem solchen Verfahren alle möglichen Verhältnisse der Praxis erfaßbar seien.

Die Verfahren zur Ermittlung der Stoffeigenschaften sind meist durch Vereinbarung festgelegt, in Deutschland z. B. in dem Vorschriftenbuch des Verbandes Deutscher Elektrotechniker, in England in den British Standard Specifications, in Amerika in den American Standards for Testing Materials, in Frankreich in den Vorschriften und Leitsätzen der Union des Syndicats de l'Electricité und in der Schweiz in den Vorschriften des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins<sup>1</sup>. Zwischen den Prüfanweisungen der genannten Länder bestehen gewisse Unterschiede. Daher ist ein Vergleich der zahlenmäßigen Ergebnisse der nach verschiedenen Vorschriften ausgeführten Messungen meist nicht möglich. Die Prüfverfahren der genannten Länder werden in den einzelnen Abschnitten ausführlich behandelt<sup>2</sup>.

Schließlich ist zu erwähnen, daß der Internationale Verband für die Materialprüfungen der Technik bemüht ist, eine Einheitlichkeit zu schaffen, um damit sichere Grundlagen für die Prüfung der Stoffeigenschaften zu gewinnen.

## B. Chemische Zusammensetzung.

### 1. Bedeutung der chemischen Analyse.

Man hat bei der Anwendung elektrischer Isolierstoffe der chemischen Zusammensetzung und damit auch der chemischen Analyse bisher sehr wenig Beachtung geschenkt. Sie interessierte nicht; wichtig und allein entscheidend waren die für die Anwendung scheinbar maßgebenden

<sup>1</sup> Die Prüfverfahren für die nichtkeramischen, kautschukfreien Isolierstoffe sind im Schweizer Arch. angew. Wiss. Techn. Bd. 4 (1938) S. 109 veröffentlicht.

<sup>2</sup> Die Prüfverfahren außereuropäischer Länder, z. B. Australien u. a. lehnen sich eng an die europäischen an und wurden nicht im einzelnen berücksichtigt.

Eigenschaften. Dieser Standpunkt ist vertretbar, wenn der Nachweis erbracht wird, daß diese Eigenschaften wirklich allein maßgebend zur Beurteilung sind, und daß außerdem unter Betriebsbedingungen der Isolierstoff physikalisch und chemisch auf Jahre unverändert bleibt. Der erste Nachweis dürfte wohl kaum je mit Sicherheit zu erbringen sein, der zweite höchstens bei einigen anorganischen Naturstoffen.

Will man also Isolierstoffe betriebssicher anwenden, so ist vielfach — vor allem bei organischen Isolierstoffen — Kenntnis der chemischen Zusammensetzung Voraussetzung. Aber auch für die Einordnung der Stoffe und zuweilen für die Wahl geeigneter Prüfverfahren ist diese Kenntnis notwendig. Sehr beliebt sind z. B. bei Prüfungen elektrischer Geräte Kurzprüfungen, bei denen unter verschärften Bedingungen Betriebsverhältnisse nachgeahmt werden. Die Verschärfung der Bedingungen ist notwendig zur Abkürzung der Prüfdauer. Wird bei diesen Kurzprüfungen auf die Art der im Gerät vorliegenden Isolierstoffe keine Rücksicht genommen, so können schwerwiegende Fehlbeurteilungen die Folge sein. Leider werden immer wieder ohne Rücksicht auf die Isolierstoffart wahllos Geräte und Stoffe solchen Prüfungen unterzogen. Sieht z. B. eine solche Kurzprüfung Temperaturen von  $100^{\circ}$  vor, um das Verhalten bei Betriebstemperaturen von etwa  $50^{\circ}$  zu erfassen, so würden bei dieser Prüfung alle Geräte versagen, bei denen Polymerisate mit Erweichungstemperaturen unter  $100^{\circ}$  verwendet wurden, obwohl diese Geräte sich bei normalem Betrieb sehr gut bewähren könnten.

Die Kenntnis der Zusammensetzung und die Kenntnis der Eigenschaften der Einzelbestandteile eines Isolierstoffes schützt weitgehend vor Fehlanwendungen und vor grundsätzlich falschen Prüfungen. Besonders notwendig, zur Zeit aber leider noch lückenhaft sind diese Kenntnisse auf dem Gebiet der organischen Stoffe. Bei diesen Stoffen ist zu berücksichtigen, daß sie altern, d. h. im Laufe der Jahre stoffliche Änderungen erleiden können, daß sie meistens noch Füllstoffe und Zusatzstoffe, z. B. Weichmacher, zur Erzielung bestimmter Eigenschaften enthalten, die im Laufe der Zeit gleichfalls stoffliche oder physikalische Änderungen (z. B. Entweichen von ungeeigneten, zu leicht flüchtigen Weichmachern), verursachen können.

So ist die chemische Analyse wichtig nicht allein für den Hersteller zur Kontrolle der Fabrikation, sondern auch für den Verarbeiter und Anwender zur Nachprüfung der Herstellerangaben, zur Feststellung von Qualitätsunterschieden innerhalb verschiedener Lieferungen und zur Identifizierung von Isolierstoffen unbekannter Zusammensetzung.

## 2. Analyse anorganischer Isolierstoffe.

Bisher sind analytische Verfahren in Prüfvorschriften für Isolierstoffe — auch im Ausland — nur ganz vereinzelt aufgenommen worden. Bei anorganischen Stoffen, bei denen die Betriebssicherheit gefährdende

Alterungserscheinungen kaum auftreten und bei denen die Identifizierung kaum Schwierigkeiten macht, ist die chemische Analyse im Rahmen von Isolierstoffvorschriften auch nur von geringer Bedeutung.

In den deutschen Vorschriften des Verbandes Deutscher Elektrotechniker (VDE-Vorschriften) sind analytische Verfahren für die Untersuchung von *Glimmer* und *Asbest* vorgesehen.

Bei der analytischen Untersuchung von *Glimmer*-Erzeugnissen begnügt man sich meist mit der indirekten Ermittlung des Bindemittelgehaltes aus dem Glühverlust. Da als Bindemittel organische Stoffe — vielfach Schellack — dienen, ist eine Veraschung ausreichend bei einer Temperatur, die unterhalb des Kalzinationspunktes für *Glimmer* bleibt, d. h. also unterhalb 600°.

Vorgeschrieben ist die Veraschung zur Ermittlung des Bindemittelgehaltes bisher nur in VDE 0332 für Kommutator-Mikanit.

Auch bei der Analyse von *Asbest* ist bisher neben der Ermittlung des *Wasser*-Gehaltes nur die Bestimmung des Glühverlustes vorgeschrieben.

Der *Wasser*-Gehalt wird nach VDE 0331 aus dem Gewichtsverlust beim 4stündigen Trocknen bei 110° bestimmt. Er soll unter 3% liegen.

Der *Glühverlust* wird nach VDE 0331 an einer 5 bis 10 g schweren Durchschnittsprobe durch mehrstündiges Glühen im Porzellantiegel im elektrischen Muffelofen bestimmt und auf das Trockengewicht bezogen.

Da diese Bestimmung zur Beurteilung der Reinheit von *Asbest* dienen soll, hat sie nur dann Zweck, wenn gleichartige *Asbest*sorten vergleichend untersucht werden, also Sorten mit gleichem Kristallwassergehalt, oder wenn von den zu untersuchenden Sorten der Gehalt an Kristallwasser bekannt ist.

Wichtiger als diese Untersuchung ist für die Beurteilung der Eignung von *Asbest* als Träger und Isolator von Heizdraht in Heizkissen die genaue Prüfung auf Abwesenheit von korrodierenden oder leitenden Einschlüssen, insbesondere Pyrit<sup>1</sup>. Häufig sind auch Metallteilchen und Gesteinssplitter im *Asbest*, deren Entfernung seitens der *Asbest*lieferanten große Schwierigkeiten bereitet hat.

Für gegebenenfalls notwendige analytische Untersuchungen anorganischer Isolierstoffe sei auf das einschlägige Schrifttum verwiesen<sup>2</sup>.

### 3. Analyse organischer Isolierstoffe.

Gut ausgebildete und für Isolierstoffuntersuchungen geeignete analytische Verfahren sind in den deutschen VDE-Vorschriften bisher nur für Gummi, d. h. Vulkanisate aus Naturkautschuk vorgesehen (VDE 0250 und 0256 für Weichgummi, VDE 0322 für Hartgummi). Für die *Analyse*

<sup>1</sup> SCHÜRMAN, E. u. W. ESCH: Z. Kautschuk, Bd. 10 (1934) S. 101.

<sup>2</sup> Zu mBeispiel: BERL-LUNGE: Chemisch-technische Untersuchungsmethoden, 8. Aufl. Berlin: Julius Springer 1931—1933 und Ergänzungswerk zur 8. Aufl., 1939—1940.

von **Weich- und Hartgummi** sind im Reich seitens des Deutschen Verbandes für die Materialprüfungen der Technik (DVM) Normblätter in Arbeit, von denen der größte Teil bereits erschienen ist. Die dort niedergelegten Verfahren sind auch für die Untersuchung von Gummi in seiner Eigenschaft als Isolierstoff geeignet.

Das Blatt DIN DVM 3551 regelt die *Probenahme* für die chemische Analyse, da sorgfältige und sachgemäße Probenahme für das Gelingen der Analyse Voraussetzung ist.

DIN DVM 3554 beschreibt die Bestimmung des *Feuchtigkeits*-Gehaltes (Lagern über konzentrierter Schwefelsäure im Vakuum bis zur Gewichtskonstanz).

Die *wasserlöslichen Bestandteile* werden nach DIN DVM 3556 durch  $3 \times 10$  min langes Extrahieren mit kochendem Wasser ermittelt. Dabei werden ganz oder teilweise Leim, Gelatine, Glycerin, Stärke, Zucker, Alkalien, verschiedene Vulkanisationsbeschleuniger erfaßt, also Stoffe, die zum Teil das Isolationsvermögen von Gummi schädlich beeinflussen können.

Die *azetonlöslichen Bestandteile* umfassen Kautschuk-Harze, die meisten Weichmacher, wie Paraffin, Wachse, Harzöl, Wollfett u. a., organische Beschleuniger und Alterungsschutzmittel, freien, zum Teil auch gebundenen Schwefel insbesondere bei Gegenwart von Faktis, sowie organische Zusatzstoffe wie Naphthalin, Ester usw., ferner zum Teil depolymerisierten Kautschuk, Teere, fette Öle, Faktis, unter Umständen auch bituminöse Stoffe. Die Bestimmung dieser Bestandteile wird in DIN DVM 3557 beschrieben (16 h Extrahieren mittels Azeton).

*Chloroformlösliche Bestandteile* sind bituminöse Stoffe, depolymerisierter, unvulkanisierter und schwach vulkanisierter Kautschuk, die annähernd quantitativ herausgelöst werden, sofern der Gummi vorher mit Azeton extrahiert wurde. Die Prüfung wird nach DIN DVM 3558 vorgenommen (4 h Extraktion mit Chloroform).

Anteile von oxydiertem Kautschuk, oxydierten Ölen und Faktissen, stickstoffhaltigen Stoffen wie Eiweiß, Wolle, Kasein, werden nach DIN DVM 3559 durch 6stündige Extraktion mit halbnormaler ( $n/2$ ) methylalkoholischer Kalilauge erfaßt, sofern der Gummi vorher mit Azeton und Chloroform extrahiert worden war („Bestimmung der *in halbnormaler methylalkoholischer Kalilauge löslichen Bestandteile*“).

Die Bestimmung der *xylolunlöslichen Bestandteile* nach DIN DVM 3560 dient zur Ermittlung mineralischer und organischer in Xylol nicht löslichen Zusatzstoffe zum Gummi.

Bei der Bestimmung der *mineralischen Bestandteile* durch Veraschung nach DIN DVM 3568 ist darauf zu achten, daß der beim Veraschen von Gummi verbleibende Rückstand die mineralischen Bestandteile meist nicht mehr in der ursprünglichen Form und Menge enthält. So werden beim Veraschen z. B. Karbonate und Sulfide in Oxyde umgewandelt,

Hydratwasser ausgetrieben usw. Beim DVM sind ferner die Bestimmungen für *Schwefel* in seinen verschiedenen Bindungen in Vorbereitung, sowie die Bestimmung der *verseifbaren* und *unverseifbaren Bestandteile*.

Über Einzelheiten der analytischen Untersuchung von Gummi sei auf die betreffenden Normblätter verwiesen<sup>1</sup>.

Einige kurze analytische Angaben für *Preßspan* und *Isolierlacke* findet man in den französischen Vorschriften.

Die französischen Vorschriften U.S.E.<sup>2</sup> 1937/38—51, S. 1053/1054, sehen für die analytische Untersuchung von **Preßspan** folgende Verfahren vor:

Zur Bestimmung des *Aschegehaltes* werden zunächst 2 g bei 800 bis 900° C verascht. Die Asche wird dann nach dem Erkalten mit Ammonium-Karbonat-Lösung befeuchtet, danach bei 100° bis zur Gewichtskonstanz getrocknet und anschließend auf über 500° erhitzt, um den Karbonatüberschuß abzutreiben. Der Rückstand gibt den „Aschegehalt“.

Der *Säure- und Alkaligehalt* wird in 10 g Preßspan bestimmt. Die Probe wird im 250-cm<sup>3</sup>-Kolben 10 min mit 200 cm<sup>3</sup> kochendem Wasser behandelt. Nach Abgießen des Wassers wird zweimal mit je 75 cm<sup>3</sup> kochendem Wasser nachbehandelt. Die drei vereinigten wäßrigen Auszüge werden zur Bestimmung des Säuregehaltes mit  $\frac{1}{10}$  n-NaOH, zur Bestimmung des Alkaligehaltes mit  $\frac{1}{10}$  n-SO<sub>4</sub>H<sub>2</sub> titriert (Indikator: Methylorange).

Zur Bestimmung des *Alkoholextraktes* werden 10 g zerkleinerter Preßspan im Soxhlet-Apparat „bei 90°“ (?) mit 100 cm<sup>3</sup> Alkohol ausgezogen. Der Auszug wird auf dem Wasserbad eingedampft und der Rückstand gewogen.

Der *Feuchtigkeitsgehalt* wird durch Trocknen bei 105° bis zur Gewichtskonstanz bestimmt.

Die französischen Vorschriften U.S.E. 1937/38—27, S. 898, geben für die chemische Prüfung von **Isolier-Lacken** (Öllacke und Kunstharzlacke) unter anderem folgendes an:

Zur Bestimmung des *Gehaltes an Lösungsmitteln* ist das Lösungsmittel mittels Wasserdampf abzutreiben und der Rückstand bei 130° C zu trocknen. Aus dem Rückstand wird der Lösungsmittelgehalt berechnet.

*Chemische Verunreinigungen* des Isolierlackes werden durch Schütteln des Lackes mit Wasser ermittelt; die Reaktion des Wassers (alkalisch, sauer) wird untersucht. Zu den „Verunreinigungen“ gehört auch Schwefel. Zum Nachweis von Schwefel wird etwas Lack mit Natrium erhitzt. Enthält der Lack Schwefel, so läßt sich das gebildete Schwefelnatrium durch kochendes Wasser ausziehen und im erkalteten wäßrigen Auszug mittels Silbernitratlösung nachweisen (schwarzer Niederschlag

<sup>1</sup> Zu beziehen durch Beuth-Vertrieb G. m. b. H. Berlin SW 68.

<sup>2</sup> Normalisations, Spécifications et Règles techniques, établies de l'Union des Syndicats d'Electricité 1937/38.

von Schwefelsilber). Als weiterer Nachweis von Schwefel wird Erhitzen des Lackes mit Soda auf Kohle angegeben; die befeuchtete Schmelze wird mit metallischem Silber in Berührung gebracht. Bei Anwesenheit von Schwefel im Lack bildet sich auf dem Silber ein schwarzer Fleck von Schwefelsilber.

Zur Bestimmung des Gehaltes an *Wasser* im Lack wird das Xylol-Verfahren vorgeschrieben. 500 cm<sup>3</sup> Lack werden mit 500 cm<sup>3</sup> Xylol destilliert. 400 cm<sup>3</sup> des Destillates werden in einem in mm<sup>3</sup> eingeteilten Meßgefäß aufgefangen.

Zur *Säurezahl*-Ermittlung werden 10 g Lack im 200-cm<sup>3</sup>-Erlenmeyer-Kolben mit 50 cm<sup>3</sup> einer Mischung von absolutem Alkohol und Benzol (1 : 1) übergossen und auf dem Wasserbad unter Rückfluß 30 min. erhitzt. Nach dem Erkalten werden 40 cm<sup>3</sup> des Gemisches Alkohol-Benzol mittels  $\frac{1}{10}$  n-K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>-Lösung titriert (Indikator: Phenolphthalein). Als „Säurezahl“ sind die mg Kalium-Karbonat anzugeben, die zum Neutralisieren von 1 g Lack (ohne Lösungsmittel) notwendig sind.

Der *Aschegehalt* wird durch vorsichtiges Erhitzen von 10 g Lack in einem Quarz- oder Porzellantiegel möglichst im Muffelofen bestimmt und auf lösungsmittelfreien Lack berechnet.

Die chemische Analyse der **Kunststoffe**, vor allem der **Polykondensate** und **Polymerisate** ist hinter der Entwicklung der Herstellungsverfahren für diese Stoffe stark zurückgeblieben. So findet man bisher weder in inländischen noch in ausländischen Vorschriften für Isolierstoffe analytische Verfahren für organische Kunststoffe, obwohl gerade für diese Stoffe die vorher aufgezeigten Notwendigkeiten am stärksten gegeben sind. Lediglich in den britischen Vorschriften ist ein Verfahren zur Bestimmung der *azetonlöslichen Anteile* festgelegt.

Dieses Verfahren in den britischen Normen für *Phenol-Kunstharz-Preßmassen* und *-Preßlinge*<sup>1</sup> dient zur Bestimmung des *Aushärtungsgrades* bei Preßteilen aus Phenolharzen, da im allgemeinen mit zunehmendem Aushärtungsgrad die azetonlöslichen Anteile abnehmen. Zur Bestimmung wird aus dem Preßteil eine Durchschnittsprobe entnommen, durch Feilen zerkleinert und gesiebt (übermäßige Erwärmung ist beim Feilen zu vermeiden). 6 bis 8 g des erhaltenen Pulvers werden 18 h über konzentrierter Schwefelsäure getrocknet; 4 bis 6 g des getrockneten, genau gewogenen Pulvers werden im Soxhlet-Apparat 6 h mit Azeton extrahiert (20 Wechsel/h), anschließend bis zur Gewichtskonstanz bei 95 bis 100° getrocknet. Aus der Gewichts-differenz wird der Azetonextrakt berechnet.

Im übrigen Schrifttum liegen bisher nur wenige für die Kunststoffanalyse verwertbare Arbeiten vor.

<sup>1</sup> British Standard Specification for Synthetic Resin (Phenolic) Moulding Materials and Moldings, Nr. 771—1938; herausgegeben von der British Standard Institution, London, 28 Victoria Street.

Zur Identifizierung von Kunststoffen, vor allem von *Polymerisaten*, dürfte ein Analysengang geeignet sein, der von BANDEL beschrieben worden ist<sup>1</sup>:

### Gang der chemischen Kunststoffanalyse.

#### I. Vorprüfungen.

##### A. Vorprüfung durch trockne Destillation.

Stoff ist flüchtig (flüchtige Monomere):

- Polystyrol
- Polyakrylsäureester
- Polymethakrylsäureester
- Polyisobutylene

Stoff zersetzt sich; Schwaden reagieren:

1. alkalisch
  - Harnstoff-Formaldehyd-Kondensationsprodukte
  - Proteinoplaste
2. sauer
  - Polyvinylester
  - Zellulose- und andere Ester
3. mineralsauer
  - Zellulosenitrat (Nitrozellulose) (verpufft auch)
  - Chlorkautschuk
  - Polyvinylchlorid

Stoff bildet kristallinisches Sublimat:

- Phthalsäureester

Stoff entwickelt Schwefelwasserstoffgeruch:

- Alkylpolysulfide

##### B. Vorprüfung im filtrierten ultravioletten Licht (Fluoreszenzfarben)

###### I. Naturharze und deren Ester:

- Kolophonium . . . . . lebhaft hellviolettblau
- Kolophonium-Glyzerinester . . . . . lebhaft hellviolettblau
- Kolophonium-Phenolaldehydester . . . . . leuchtend hellviolettblau

###### II. Umwandlungsprodukte anderer Naturstoffe

- Hydrozellulose . . . . . farblos
- Alkylzellulose . . . . . sehr schwach bläulich
- Zellulosenitrat . . . . . gelbbraun
- Chlorkautschuk . . . . . sehr schwach hellblau

###### III. Kunstharze

###### a) Kondensationsharze

- Phenol-Formaldehydharz  
(Novolak, Resol, Resit) . . . . . intensiv bläulichviolett, ähnlich  
wie Kolophonium, nur stärker
- Zyklohexanonharz . . . . . schwach grüngelb
- Harnstoff-Formaldehydharz  
(Pollopas) . . . . . bläulichweiß

<sup>1</sup> BANDEL, G.: Z. angew. Chem. Bd. 51 (1938) S. 570. — Z. Kunststoffe Bd. 28 (1938) S. 228.

## b) Polymerisationsprodukte

Kumaronharz . . . . .	intensiv dunkelviolet, in der Durchsicht hellbraun
Polyvinylchlorid . . . . .	mattes Blaugrün
Polystyrol . . . . .	starkes Blauviolett
Polyvinylmethyläther . . . . .	schwach gelb
Polyakrylnitril . . . . .	intensiv hellgelb
Polyakrylmethylester . . . . .	stumpf weißblau
Polybutadien (Buna) . . . . .	stark violett

## II. Qualitative Prüfung auf Stickstoff (N), Schwefel (S), Phosphor (P), Chlor (Cl) und Bestimmung der Verseifungszahl.

Schmelzen der Substanz mit metallischem Kalium, in gelöster Schmelze Nachweis von N durch Berlinerblau-Probe, von S mit Nitroprussidnatrium, P durch die Molybdatreaktion und Cl mit Silbernitrat. Verseifung mit n-alkoholischem KOH durch Kochen am Rückfluß und Zurücktitrieren der überschüssigen Lauge. Bei schwer verseifbaren Stoffen unter Umständen Anwendung äthylglykolischer KOH erforderlich.

*N, S, P und Cl sind nicht nachweisbar, kennzeichnend ist die Verseifungszahl.*

Unverseifbar (Verseifungszahl unter 20).

Polymere Kohlenwasserstoffe.

*Naturkautschuk, Buna.* Ungesättigt, schwerlösliche Bromadditionsprodukte.

*Oppanol.* Zu niedrig siedenden Verbindungen depolymerisierbar, die stärker ungesättigt sind.

*Polystyrol* (Trolitul, Ronilla S, Victron). Bei 310 bis 350° zu Styrol depolymerisierbar, mit Brom Dibromstyrol (Smp. 74°), durch verdünnte HNO<sub>3</sub> Benzoesäure (Nachweis durch Farbreaktion).

*Phenol- (Kresol-, Xylenol-) Formaldehyd-Kondensationsprodukte.* Erhitzen mit alkoholischer Kalilauge, Zusatz einer Lösung von diazotiertem 4-Nitranilin oder von Echtrotsalz 3 GL gibt Bildung von rotem Farbstoff. Im A- und B-Zustand beträchtliche Hydroxylgehalte, im C-Zustand unlöslich. Unterscheidung von Phenol- und Kresol-Kondensationsprodukten durch oxydativen Abbau der letzteren mit Chromschwefelsäure zu Essigsäure (Bestimmung), wobei Phenol-Kondensationsprodukte zu CO<sub>2</sub> und H<sub>2</sub>O verbrannt werden.

*Zellulose* (Zellophan, Transparit, Cuprophan): Nutzbarmachung der typischen Reaktionen der Hydrozellulose: Löslichkeit in Kupferoxydammoniak, Blauschwarzfärbung mit Jodjodkalium, Reduktion von Fehlingscher Lösung u. a.

### Äther.

*Zelluloseäther* (Tylose, Colloresin, Glutolin). Methylzellulose, wasserlöslich, gibt Reaktion auf Kohlehydrate nach MOHLISCH. Äthylzellulose in Wasser unlöslich, in anorganischen Lösungsmitteln löslich. Bestandteile der Alkoxygruppe nach ZEISEL in beiden Fällen quantitativ. Benzylzellulose: Abspaltung des Benzylrestes mit Essigsäure-Anhydrid und Schwefelsäure als Benzylazetat und Isolierung, auch quantitative Verseifung, Oxydation, Nachweis der Benzoesäure nach üblichen Verfahren.

*Polyvinyläther* (Lutonal, Plastomoll) geben mit Essigsäure-Anhydrid und konzentrierter Schwefelsäure Farbreaktionen (blau bis grün).

*Kumaronharze.* Erhitzen auf über 300° gibt monomeres Kumaron, Identifizierung durch Dibromid (Smp. 88 bis 89°) und Pikrat (Smp. 102 bis 103°).



## Azetale.

*Polyvinylazetale* (Mowital, Pioloform). Spaltung durch Kochen mit 25%iger Schwefelsäure, Nachweis des Aldehyds mit fuchsin-schwefeliger Säure, Identifizierung des Alkohols im Destillationsrückstand. Quantitative Bestimmung z. B. durch Oximierung der Azetale mit Hydroxylaminchlorhydrat in der Wärme, wobei äquivalente Menge HCl frei und durch Titration bestimmbar wird.

*Zyklohexanon-Formaldehydharze* (AW2-Harz) geben Reaktion von STORCH-MORAWSKY, jedoch als Dauerfärbung.

## Verseifungszahl bis 200.

*Phenolformaldehyd-Kolophoniumester* (Leukopale, Albertol 111 L). Schwer verseifbar, bisweilen 24stündiges Erhitzen erforderlich; Verseifungszahlen bei 140 bis 160. Kupplungsreaktion auf Phenol und Harzreaktion nach STORCH-MORAWSKY.

*Phenolformaldehyd-Kolophoniumglyzerinester* (Albertol, Beckazite). In ihnen kann Glycerin festgestellt werden; Beurteilung nach der Säurezahl, Bestimmung durch Verseifungszahl und Ermittlung des Glyzeringehaltes nach WILLSTÄTTER-MADINAVEITA

*Kolophonium-Glyzerinester* (Harzester). Sie unterscheiden sich von vorstehenden durch den negativen Ausfall der Reaktion auf Phenole.

## Verseifungszahl über 200.

*Zelluloseazetate* (Cellit, Cellon, Trolit W). Nach Verseifung mit Säure oder Lauge Essigsäure nachweisbar (Farbreaktion mit Lanthannitrat, Jod und Ammoniak). Isolierung durch Ausfällen aus Benzollösungen. Azetylgehalt durch Ermittlung des Alkaliverbrauches bei der alkalischen Verseifung oder durch Verseifung mit Phosphorsäure und Titration der abdestillierten Essigsäure.

*Polyvinylazetat* (Mowilith, Vinnapas, Vinnilith) gibt mit Essigsäure-Anhydrid und konzentrierter Schwefelsäure typische Farbreaktion (grün bis blau). Mit alkoholischem KOH leicht und quantitativ verseifbar. Polyvinylalkohol fällt, da in Alkohol schwer löslich, während der Verseifung aus. Bestimmung durch Löslichkeit in Wasser und Fällbarkeit durch Alkohol. Nachweis der Essigsäure wie unter „Zelluloseazetate“.

*Polyakrylsäureester* (Acronal, Plexigum, Plextol) werden bei 280—300° leicht depolymerisiert, monomerer Ester destilliert über, erkennbar an charakteristischem Geruch; annähernd theoretische Verseifungszahlen und Alkoxywerte nach ZEISEL.

*Polymethakrylsäureester* (Metacral) geben bei Verseifung und Bestimmung nach ZEISEL wesentlich niedrigere Werte. Spezifische Reaktion: Reduktion von Methakrylsäure mit Natriumamalgam oder Zinkstaub in saurer Lösung zu Isobuttersäure (erkennbar am Geruch).

*Phthalsäure-Glyzerinester* (Glyptal). Identifizierung meist schon in Vorprüfung durch Sublimat von Phthalsäure. Nachweis durch Fluoreszeinbildung (Erhitzen mit Resorzin und Schwefelsäure) am besten an dem bei der Verseifung mit alkoholischer Kalilauge ausfallenden Kaliumphthalat. Mit Rücksicht auf die Verwendung von Phthalsäureestern als Weichmacher müssen diese zuvor gegebenenfalls durch Extraktion mit Äther oder Petroläther entfernt werden. Beurteilung der Glyptale und Alkydale durch Säurezahl. Quantitative Bestimmung der Phthalsäure durch Wägung des bei der Verseifung erhaltenen alkoholunlöslichen Kaliumsalzes; ist Reinabscheidung nicht möglich, so wird Phthalsäure aus saurer Verseifungslösung mit Äther ausgeschüttelt und titriert.

*Phthalsäure-Fettsäureglyzeride* (Alkydale). Nach Verseifung wird Fettsäure mit Benzol extrahiert und durch Kennzahlen identifiziert. Aus der wäßrigen Lösung wird Phthalsäure mit Äther extrahiert und wie oben bestimmt. Quantitative Erfassung des Glycerins nach WILLSTÄTTER-MADINAVEITA.

*Kolophonium-Maleinsäure-Glycerinester* (K.M.-Harz). Schwache Reaktion nach STORCH-MORAWSKY. Unterscheidung von gewöhnlichen Fichtenharzsäureestern durch niedriges Äquivalentgewicht bzw. höhere Säurezahl der frei gemachten Harzsäure.

*Außer Kohlenstoff (C), Wasserstoff (H) und Sauerstoff (O) sind nachweisbar:*

Nur Stickstoff.

*Zellulose-Salpetersäureester* (Nitrozellulose, Zelluloid, Zellhorn). Identifizierung des Zellulosenitrats durch Nachweis von Salpetersäure mit Diphenylamin-Schwefelsäure im Verseifungsgemisch. Quantitative Bestimmung nach bekannten Methoden. Ausfällung von Zellulosenitrat aus Lösungen mit Benzol.

*Harnstoff-Formaldehyd-Kondensationsprodukte* (Plastopal, Pollopas, Resopal, Kaurit) spalten beim Erhitzen mit 25%iger Schwefelsäure Formaldehyd ab, Nachweis mit fuchsin-schweiflicher Säure. Quantitative Bestimmung der Amino-plaste durch Stickstoffbestimmung nach KJELDAHL.

*Polyakrylsäurenitril und Mischpolymerisate*. Depolymerisation durch Erhitzen, Auftreten geringer Mengen Zyanwasserstoffes. Anteil an Akrylnitril in *Perbunan* durch Stickstoffbestimmung nach KJELDAHL feststellbar.

*Anilin-Formaldehyd-Kondensationsprodukte* (Cibanit) werden durch Kochen mit 20%iger Schwefelsäure teilweise gespalten; die schwefelsaure Lösung wird diazotiert und auf sodaalkalischer R-Salzlösung gekuppelt. Auftreten eines leuchtend roten Farbstoffes bei Anwesenheit von Anilinharz.

*N-haltige Polyvinylverbindungen* (Luvican).

Nur Schwefel.

*Alkylpolysulfide* (Thiokol) und *vulkanisierter Kautschuk, Hartgummi*. Die ersten sind am Geruch und Auftreten von Schwefelwasserstoff bei trockner Destillation zu erkennen. Die zweiten sind an Löslichkeitseigenschaften (unlöslich in den meisten Lösungsmitteln mit Ausnahme von Chlorkohlenwasserstoffen, Petroleum und Nitrobenzol) zu erkennen und durch Fällung als Nitrosat bzw. Bromadditionsprodukt zu bestimmen.

Nur Stickstoff und Schwefel.

*Thioharnstoff-Formaldehyd-Kondensationsprodukte* geben eine sehr empfindliche und spezifische Reaktion mit Kupfersalzen und Kaliumferriozyanid.

*Sulfamid-Formaldehyd-Kondensationsprodukte* verseifbar zu den Sulfosäuren, diese nachweisbar nach üblichen Methoden (z. B. Alkalischmelze).

Stickstoff, Schwefel und Phosphor.

*Eiweiß-Kondensationsprodukte* (Galalith, Kunsthorn). Schon in Vorprüfung bei trockner Destillation durch Geruch erkennbar. Unterscheidung von Naturhorn durch Feststellung des Permanganatverbrauches eines Extraktes mit Schwefelsäure (wesentlich höherer Verbrauch als Horn). Quantitative Bestimmung durch Stickstoffbestimmung nach KJELDAHL.

*Phosphorsäureester*, z. B. *Triakresylphosphat*, werden oft als Weichmacher verwendet. Entfernung durch Extraktion mit Petroläther.

Nur Chlor.

*Chlorkautschuk* (Pergut, Tornesit, Dartex, Tegofan, Trotex, Alloprene, Elektrogomme, Irgonit). Unterscheidung von Polyvinylchloridpräparaten durch eigenartig dumpfen Geruch bei trockner Destillation. Feststellung der Gegenwart von anderen chlorfreien verseifbaren Stoffen aus der zur Verseifung erforderlichen Alkalimenge und dem Chlorgehalt der verseiften Lösung. Quantitative Bestimmung aus dem Gesamtchlorgehalt (Aufschluß in der Bombe nach BURGESS-PARR).

*Polyvinylchlorid und Mischpolymerisate* (Igelit PCU, Igelit PC, Igelit MP, Mipolam, Astralon, Decelith, Vinoflex). Polyvinylchlorid verhält sich als solches und in Mischpolymerisaten wie Chlorkautschuk. Bestimmungsmethoden die gleichen. Chlor wesentlich schwerer abspaltbar. Reines Polyvinylchlorid (PCU): etwa 55% Cl, nachchloriertes Produkt (PC) 64 bis 66% Cl, Mischpolymerisat mit Akrylsäureester (MP): etwa 46,5% Cl.

Für **härtbare Preßmassen** aus Phenolharzen sind im Staatlichen Materialprüfungsamt Berlin-Dahlem Verfahren zur quantitativen Analyse entwickelt worden<sup>1</sup>.

Ein großer Teil der Kunstharz-Preßmassen auf Phenol-Harzgrundlage enthält neben Kunstharz und Füllstoffen solche Stoffe, die als Härtungsbeschleuniger bei der Verpressung der Massen dienen (z. B. Hexamethylentetramin). Wenn die Zusammensetzung einer solchen Preßmasse quantitativ ermittelt werden soll, ist es notwendig, vor der Extraktion mit Azeton zunächst das Hexamethylentetramin durch Ausziehen mit Wasser von 50° C zu entfernen.

Der *Beschleuniger* wird dann quantitativ und qualitativ bestimmt z. B. durch Stickstoffbestimmung nach KJELDAHL oder Abspaltung von Formaldehyd und Ammoniak. Ist der Beschleuniger aus der Kunstharzpreßmasse entfernt, so wird diese bei 70° C getrocknet und anschließend im Gräfe-Apparat mit Azeton extrahiert. Die Extraktion ist bei einer Einwaage von 20 g in etwa 8 h beendet.

Das extrahierte *Kunstharz* wird nach dem Verdampfen des Azetons gewogen und qualitativ weiter daraufhin untersucht, ob es sich vorwiegend um ein Phenol- oder Kresolharz handelt. Die Kennzeichnung des Harzes erfolgt durch Untersuchung der Reaktionsprodukte, die bei seiner trocknen Destillation im Stickstoffstrom erhalten werden. Die trockne Destillation hat gegenüber anderen Methoden den Vorteil geringeren Zeitaufwandes, und da es sich überdies hierbei nicht um eine quantitative Bestimmung handelt, sind die Ergebnisse für die vorliegenden Zwecke ausreichend. Im Destillat erfolgt der Nachweis des Phenols bzw. der Kresole in bekannter Weise, z. B. durch die Eisenchloridreaktion, verschiedene Löslichkeit in Wasser, Kupplung der alkalisch gemachten Lösung mit Diazokörpern, Geruch usw.

Der bei der Extraktion mit Azeton in der Hülse verbliebene Rückstand enthält *Füllstoffe*. Er wird nach Trocknung und Wägung zunächst mikroskopisch geprüft, wobei sich ein etwaiger Gehalt an Faserstoffen zu erkennen gibt. Dann wird ein Teil der Füllstoffe zur Ermittlung des Gehaltes an anorganischen Bestandteilen verascht. Ein anderer Teil wird mit Natronkalk etwa 4 h in einem Ölbad auf 250° C erhitzt, und der wäßrige Auszug des Reaktionsproduktes wird auf Anwesenheit von Phenolen geprüft. Fällt diese Probe positiv aus, so ist zu vermuten, daß

<sup>1</sup> ESCH, W.: Z. Kunststoffe Bd. 28 (1938) S. 226.

der Preßmasse gemahlene Preßstoffabfälle als Füllstoffe zugesetzt waren. Diese Feststellung ist im Rahmen der Überwachung typisierter Preßmassen oft sehr wichtig.

Die Untersuchung der Preßmassen auf *Harnstoff-Harz*grundlage erfolgt in ähnlicher Weise.

Wesentlich schwieriger aber gestaltet sich die quantitative Analyse **gehärteter Preßstoffe**. Hier gibt die Höhe des Azetonextraktes einen Anhalt für den Grad der Aushärtung des Preßstoffes. Eine Aschenbestimmung gibt Aufschluß über die Anwesenheit anorganischer Füllstoffe. Der wirkliche Harz- und Füllstoffgehalt läßt sich aber bei den gehärteten Preßstoffen vorläufig noch nicht mit Sicherheit quantitativ analytisch ermitteln.

Ein Verfahren, das in einigen Fällen geeignet ist, den *Gehalt an Harz* und *Füllstoffen* in *gehärteten Preßstoffen* zu ermitteln, ist von W. ESCH und R. NITSCHÉ veröffentlicht worden<sup>1</sup>.

Das Verfahren beruht darauf, daß alkalische Mittel ausgehärtetes Phenol- und Kresolharz angreifen und daß organische Basen mit besonderem Vorteil zum genannten Zweck verwendbar sind. Von den phenolischen Substanzen haben die Naphthole das stärkste Angriffsvermögen. Es ist z. B. durch Einwirkung von  $\alpha$ - oder  $\beta$ -Naphthol im geschmolzenen Zustand möglich, bei einigen Preßstoff-Sorten der Typen T 1, T 2, T 3, Z 1, Z 2, Z 3, bei einigen Hartpapieren und Hartgeweben den organischen Füllstoff völlig von dem umhüllenden Kunstharz zu befreien, ohne ihn zu zerstören (vgl. Abb. 3 und 4). Insbesondere kann auch bei Preßteilen der Typen T 3 und Z 3, für die die Bedingung besteht, daß beim Preßvorgang der Faserverband in seiner ursprünglichen Anordnung weitgehend erhalten bleibt, geprüft werden, ob und inwieweit diese Bedingung erfüllt ist.

Zur Ausführung des Verfahrens wird die gewogene Probe in einer Drahtgewebehülse in einem kleinen Autoklaven in geschmolzenes Naphthol eingehängt und während 24 h bei 160 bis 180° darin belassen. Sie wird dann durch ein Gemisch von 1 Teil Alkohol : 3 Teile Benzol vom anhaftenden Naphthol befreit, anschließend mit Äther extrahiert und getrocknet. Die Differenz der Einwaage gegenüber der Rückwägung ergibt annähernd den Harzgehalt des ausgehärteten Preßstoffes.

Die zunehmende Anwendung von **nichthärtbaren Kunststoffen** zur Isolierung und Ummantelung von Leitungen in der Kabeltechnik hat die Notwendigkeit zur Ausarbeitung analytischer Verfahren gegeben.

Für einen Teil der hier in Frage kommenden Massen, und zwar für die auf Grundlage von Polyvinylchlorid bzw. Mischpolymerisat + Weichmacher (mit oder ohne Füllstoffe) hergestellten Mischungen hat die Fach-

<sup>1</sup> ESCH, W. u. R. NITSCHÉ: Z. Kunstharze u. andere plast. Massen Bd. 8 (1938) S. 249.

gruppe für Chemie der Kunststoffe im VDCh die folgenden Prüfverfahren ausgearbeitet<sup>1</sup>:

*Flüchtige Bestandteile (Feuchtigkeit)*. Ermittelt wird die Gewichtsabnahme von 2 g bei dreistündigem Erhitzen auf 110° C.

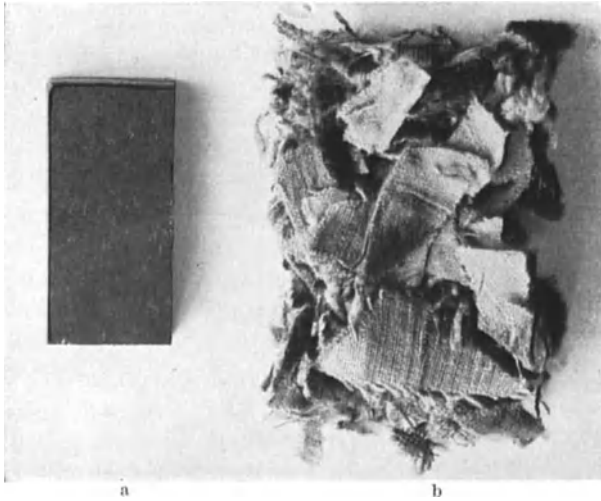


Abb. 3a und b. Wirkung von  $\beta$ -Naphthol auf Phenolharz-Preßstoff Typ T 2. a Probe vor, b Probe nach der Behandlung.

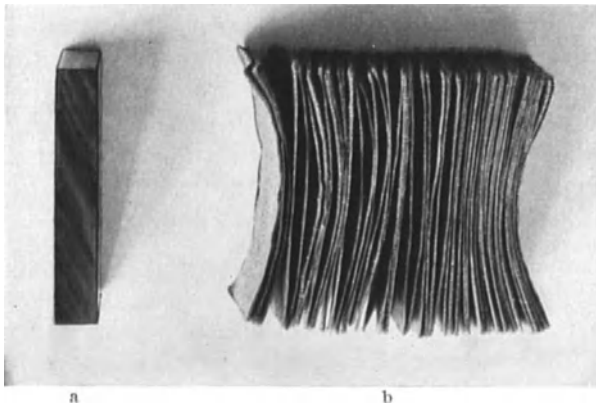


Abb. 4a und b. Wirkung von  $\beta$ -Naphthol auf Hartpapier (Seitenansicht). a Probe vor, b Probe nach der Behandlung.

*Asche* wird als Sulfat-Asche (Abrauchen mit konzentrierter Schwefelsäure) an 2 g bestimmt.

*Chlor*. Notwendig ist beim Aufschluß die Verwendung geschlossener Apparaturen, um Chlorverluste zu vermeiden (z. B. Verfahren nach

<sup>1</sup> Vgl. dazu auch W. BERGER: Kunststoffe Bd. 30 (1940) S. 35.

CARIUS oder nach BURGESS-PARR oder nach BAUBIGNY und CHAVANNE in der verbesserten Apparatur von WALTER<sup>1</sup>). Ohne Weichmacher und Füllstoffe soll Polyvinylchlorid (PCU)  $55,5 \pm 1\%$  Chlor enthalten, das nachchlorierte Produkt (PC) etwa 65%, das Mischpolymerisat  $46,5 \pm 1\%$ .

*Weichmacher.* 5 g werden erschöpfend mit Äther extrahiert.

*Füllstoffe.* 1 g wird in 25 cm<sup>3</sup> Zylohexanon oder Tetrahydrofuran bei etwa 50° gelöst, mit 50 cm<sup>3</sup> Aceton verdünnt und 2 h bei 3000 U/min zentrifugiert. Nach dem Dekantieren werden die Füllstoffe 4mal mit Azeton aufgerührt, zentrifugiert und dekantiert und danach bei 70° getrocknet.

Als Ergänzung dieser analytischen Verfahren dienen Verfahren zur Bestimmung der *Viskosität* (1%ige Lösung in Zylohexanon; Höppler-Viskosimeter), der *chemischen Stabilität* (p<sub>H</sub>-Wert des wäßrigen Auszuges sowie Prüfung auf Cl-Ionen) und der *thermischen Stabilität* (Zeitdauer bis zum Abspalten von Salzsäure bei höheren Temperaturen, z. B. bei PCU-Prüfung bei 170°).

Die Bestimmung des **Polymerisationsgrades**, die identisch ist mit der Bestimmung der durchschnittlichen Molekülgröße, wird nach den für die Molekulargewichtsbestimmung an Hochpolymeren geläufigen Verfahren ausgeführt. In erster Linie kommen dafür Viskositätsmessungen in Betracht, die sich auf die Staudingerschen Beziehungen zwischen Viskosität und Molekülgröße gründen<sup>2</sup>. Außerdem sind aber auch osmotische Verfahren für diese Zwecke durchgebildet worden<sup>3</sup>, und für rein wissenschaftliche Zwecke besteht noch eine Anzahl weiterer Möglichkeiten, wie isotherme Destillation, Sedimentation in der Ultrazentrifuge, Diffusion, Dialyse<sup>4</sup>.

Da diese Verfahren für den Isolierstoffanwender nur von mittelbarer Bedeutung sind, kann an dieser Stelle nicht weiter darauf eingegangen werden.

#### 4. Gefügeuntersuchungen.

Zur Identifizierung von Isolierstoffen, vor allem von Kunststoffen mit groben Füllstoffen bzw. Harzträgern, sowie zur Erkennung und zum Nachweis von Herstellungsfehlern sind Gefügeuntersuchungen recht brauchbar. Vielfach genügt zur Identifizierung für den geübten Isolierstoff-Fachmann die Betrachtung des Stoffes, seiner Oberfläche oder seiner Bruchflächen mit dem unbewaffneten Auge, gegebenenfalls ergänzt durch Prüfung des Verhaltens in der Bunsen- und Gebläseflamme,

<sup>1</sup> WALTER, E.: Chem. Fabrik Bd. 11 (1938) S. 140.

<sup>2</sup> STAUDINGER, H. u. W. HEUER: Ber. dtsh. chem. Ges. Bd. 63 (1930) S. 222. — STAUDINGER, H.: Kolloid-Z. Bd. 51 (1930) S. 71.

<sup>3</sup> SCHULZ, G. V.: Z. angew. Chem. Bd. 49 (1936) S. 863.

<sup>4</sup> ULLMANN, M.: Molekülgrößenbestimmungen hochpolymerer Naturstoffe. Dresden u. Leipzig 1936.

um entscheiden zu können, welcher Stoff vorliegt oder ob grobe Gefügemängel, z. B. Lunker oder bei gehärteten Preßstoffen nicht ausgehärtete

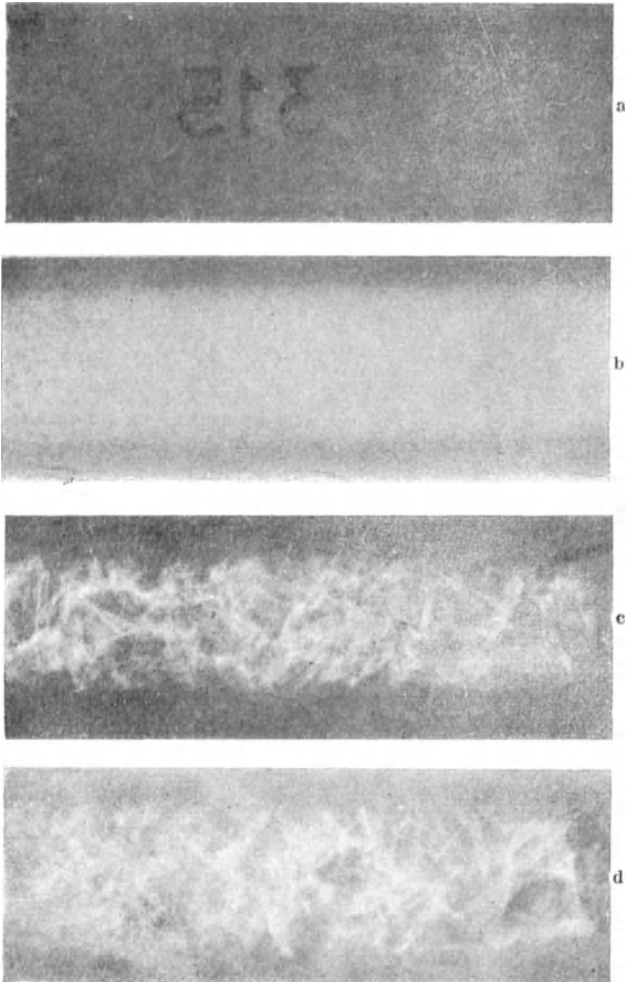


Abb. 5 a bis d. Röntgendurchleuchtungen von Preßstoff-Normalstäben (Typ S). a normale, b fehlerhafte Pressung (Kern nicht ausgehärtet), c und d stark fehlerhafte Pressungen (zahlreiche Lunker im Kern). (Aufnahme der Reichs-Röntgenstelle beim Staatlichen Materialprüfungsamt Berlin-Dahlem.)

Kernzonen, vorliegen. Mangelhafte Härtung läßt sich bequem ohne Zerstörung mittels Röntgenstrahlendurchleuchtung (vgl. Abb. 5) erkennen.

Recht interessante Aufschlüsse über Gleichmäßigkeit der Herstellung an fertigen Stücken aus Kunststoffen erhält man durch Ätzversuche<sup>1</sup>.

<sup>1</sup> Noch nicht veröffentlichte Versuche von NITSCHKE und ESCH.

Die Art des Ätzmittels richtet sich nach der Art des Kunststoffes. Für Kunstharz-Preßstoffe aus Harnstoff-Harzen eignet sich kochendes Wasser ( $\frac{1}{2}$  h Lagerung in kochendem Wasser). Ungleichmäßige Temperaturverteilung bei der Herstellung des Gegenstandes äußert sich im verstärkten Angriff des Wassers an ungenügend geheizten Stellen (vgl. Abb. 6).

Bei gepreßten Gegenständen aus Mischpolymerisat hat sich Ätzen mittels Azeton bewährt, dem ein Filmbildner (Nitrolack) zugesetzt wird, um schnelles Verdunsten zu verhüten. Abb. 7 zeigt Ausschnitte aus

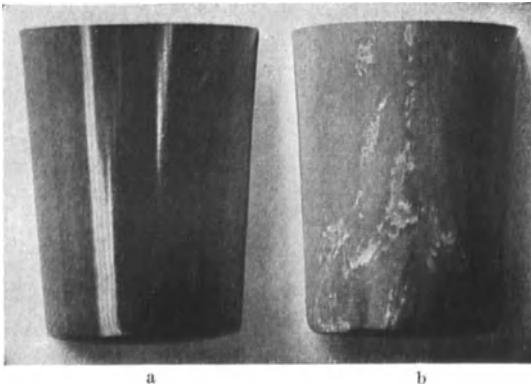


Abb. 6. Gefäß aus Harnstoffharzen a vor und b nach  $\frac{1}{2}$ stündigem Kochen. (Werkzeug für Herstellung des Gefäßes war ungleichmäßig beheizt.)

Kästen aus Mischpolymerisat, die grobe Preßfehler nach dem Ätzen erkennen lassen, deren Ausmaß mit der Schlagfestigkeit der Kästen übereinstimmt. Die Stellen, wo die Preßmasse schlecht geflossen und ungenügend verdichtet war, waren auch die Stellen verstärkten Angriffs des Ätzmittels.

Für Kunstharz-Preßstoffe aus Phenolharzen eignen sich als Ätzmittel

alkalische Mittel, die langsam lösend oder quellend auf das Kunstharz wirken und nach Zeitdauer und Temperatur verschieden schnell die Oberfläche lockern oder harzfrei machen (vgl. Abb. 8). Die Methodik des Ätzens ist noch nicht genügend durchgearbeitet, um weitere Einzelheiten angeben zu können; sie dürfte aber zur raschen Orientierung über Gefüge, Füllstoffanordnung und -verteilung, Herstellungsfehler usw. recht geeignet werden.

Für feinere Gefügeuntersuchungen an Kunstharz-Preßstoffen eignen sich die von WEIGEL angegebenen Verfahren zur mikroskopischen Gefügeuntersuchung<sup>1</sup>, die besonders dann heranzuziehen ist, wenn die Verteilung von Farbstoff- und Füllstoffteilchen oder das Gefüge der Preßhaut festzustellen ist. Gefügeuntersuchungen gestatten auch, Einflüsse der Preßbedingungen und -formen zu erkennen, etwa die Anhäufung von Füllstoffteilchen an Stellen, an denen die Preßmasse um Ecken herumfließen muß, ferner die Anreicherung an dem oberen Rand von Preßstücken, die dadurch zustande kommt, daß die Füllstoffe dem Harz voran nach oben fließen. Man kann in dieser Weise auch den Einfluß von Größe und Verteilung der Preßtabletten erkennen usw.

<sup>1</sup> WEIGEL: Kunst- und Preßstoffe, H. 1, S. 2. Berlin: VDI-Verlag 1937.



Für die mikroskopische Gefügeuntersuchung an Kunststoffen kommen Dünnschliffe zur Betrachtung im durchfallenden Licht und Anschliffe zur Untersuchung im auffallenden Licht in Betracht.

**Herstellung der Probekörper.**  
Dünnschliffe können mit verhältnismäßig einfachen Mitteln hergestellt werden. Kleine, mit einer Metallsäge abgeschnittene Scheibchen von etwa 1 mm Dicke werden zunächst auf der einen Seite auf feinem Glaspapier und anschließend auf einer mit angefeuchtetem feinem Schmirgel versehenen Glasplatte geglättet und nach Abwaschen und Trocknen mit der glatten Seite auf einem Messingblech mit Griff aufgeklebt. Als Klebemittel hat sich eine Lösung von Zellhorn in Azeton von honigartiger Dickflüssigkeit bewährt. Das Dünnschleifen geschieht durch vorsichtiges Abschleifen mit der Hand auf immer feinerem Glaspapier und zum Schluß auf der erwähnten Glasplatte. Die Schliffe lassen sich mit Azeton wieder leicht lösen und können mit Hilfe eines Messers vom Blech abgehoben werden.

Zur Herstellung von Anschliffen dienen Filzscheiben, die auf Holz aufgeklebt sind. Sie werden mit einer Paste aus Maschinenöl und feinem Schmirgel bestrichen. Es genügen 3 Schmirgelsorten, um Anschliffflächen zu erhalten, die bei 50facher Vergrößerung kratzerfrei erscheinen. Zur Erzielung von

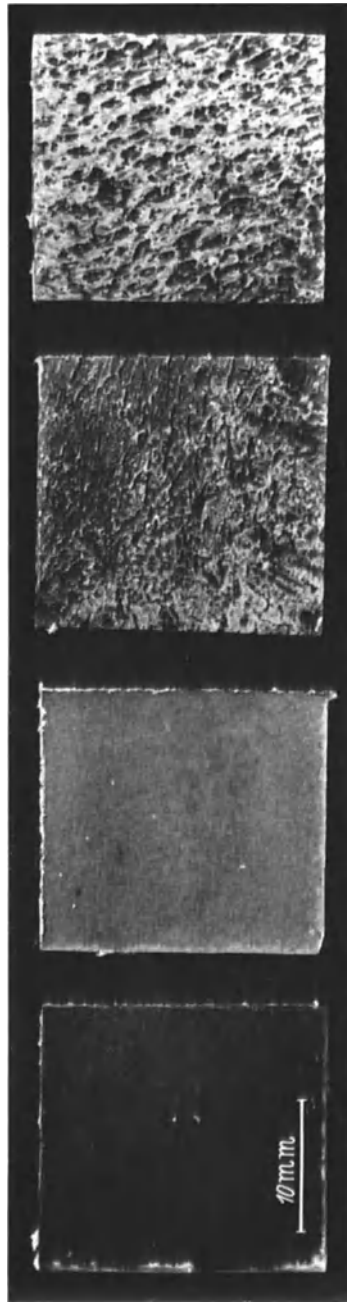


Abb. 7. Ausschnitte aus gepressten Gefäßen aus Mischpolymerisat; Pressfehler, aufgedeckt durch Ätzen. 1: ungeätzt, 2 bis 4: geätzt. Zusammenhang zwischen Ätzwirkung und Schlagfestigkeit bei Mischpolymerisat-Preßlingen: bei 2: 35 cm, bei 3: 10 cm, bei 4: 5 cm Bruch-Fallhöhe der unbehandelten Preßlinge beim Fallversuch.

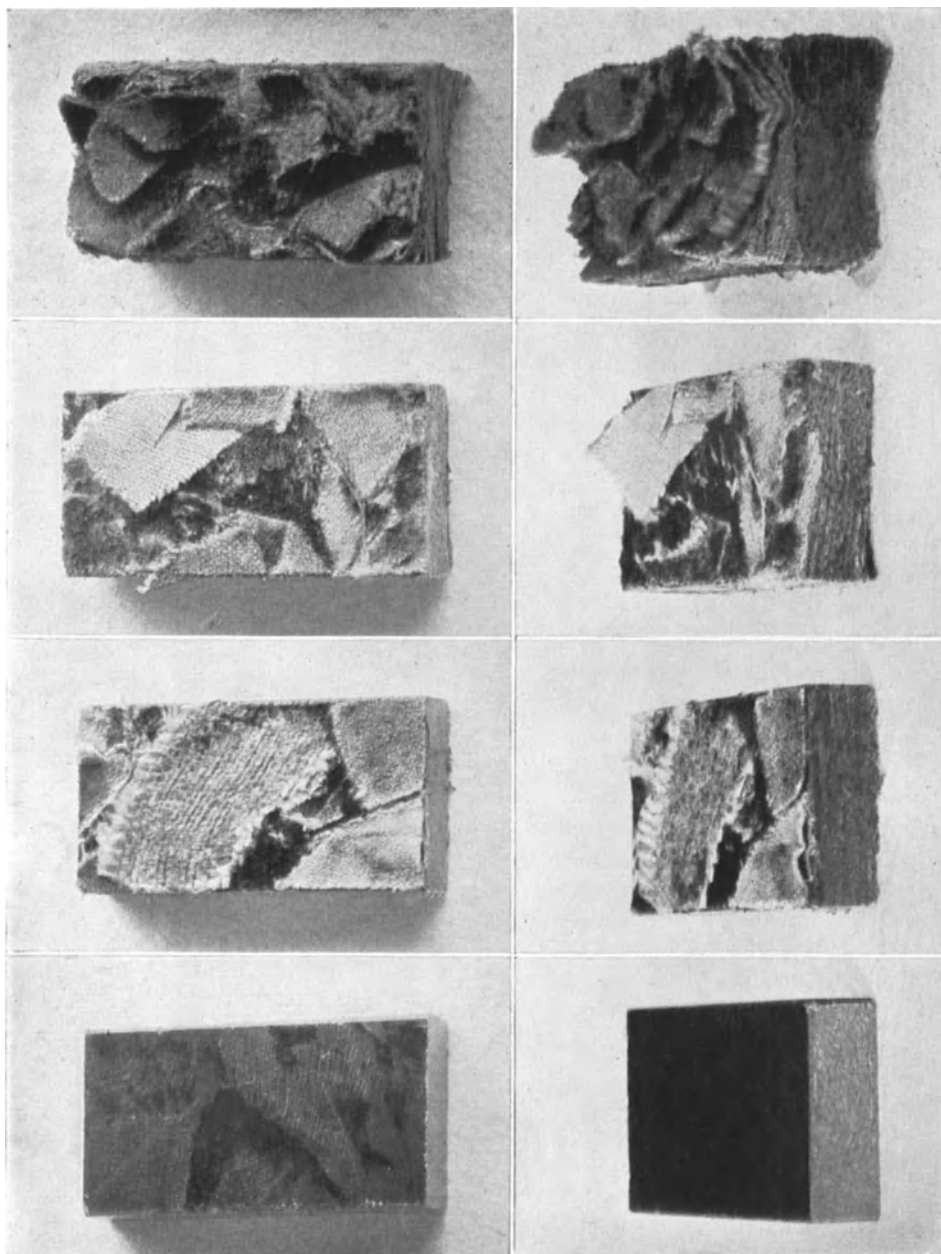


Abb. 8a bis d. Wirkung organischer Basen auf ausgehärteten Preßstoff Typ T<sub>2</sub>. Obere Reihe: Wirkung an 5 × 15-mm-Stäben in der Aufsicht. Untere Reihe: Wirkung an denselben Stäben schräg von vorn gesehen. a Probe vor der Behandlung; b Probe nach der Behandlung mit

Anschliffen, die selbst bei Vergrößerungen bis 1200fach keine Kratzer mehr aufweisen, ist Polieren notwendig. Als Poliermittel dient Eisenoxyd, das ebenso wie der Schmirgel, mit Maschinenöl vermengt, auf

einer Filmscheibe aufgetragen wird. Auch Paraffinscheiben, wie sie von M. v. SCHWARZ<sup>1</sup> angegeben wurden, haben sich bewährt, es genügen in diesem Falle sogar 2 Scheiben mit verschiedenen Körnungen. Um beim Schleifen Verschmierungen zu vermeiden, wird das Schleifen mittels Schmirgel und Kohlensäure-Schnee empfohlen.

**Ätzen und Färben.** Da sich die Füllstoffe vom Harz wegen der oft ähnlichen Färbung nur schlecht abheben, hat sich ein Anfärben der Füllstoffe als unerlässlich erwiesen. Um die Farbstofflösung mit den Füllmitteln in Berührung zu bringen, müssen zunächst die umgebenden Harzschichten durch ein Ätzmittel durchbrochen werden. Das Ätzen und Färben kann getrennt oder auch gleichzeitig vorgenommen werden. Im zweiten Falle ist vom Farbstoff außer seiner Fähigkeit, die Füllstoffe anzufärben, noch zu fordern, daß er vom Ätzmittel gelöst, dabei aber nicht zerstört wird. Besonders gut geeignet haben sich Lösungen von Methylenblau oder Fuchsin in konzentrierter Schwefelsäure. Lediglich Typ K (Harnstoffharz mit Zellulose und Beschwerungsmitteln) verlangt Trennung der beiden Vorgänge und Färbung der Zellulose mit kochender Fuchsinlösung. Vor dem Auswaschen des Ätzmittels ist eine Fixierung des Farbstoffes notwendig. Sie wird in hinreichendem Maße durch Neutralisieren der Säure in verdünnter Ammoniaklösung erzielt. Nach diesem Verfahren können sowohl Dünnschliffe als auch Anschliffe gefärbt werden.

**Wahl des Probekörpers.** Zur Feststellung der Verteilung größerer Füllstoffe wie Holzmehl, Zellulose, Asbest, Gewebeschnitzel usw. genügen Anschliffe, deren Fertigung weniger Zeit erfordert als für Dünnschliffe notwendig ist. Anschliffe sind den Dünnschliffen oft auch aus dem Grunde vorzuziehen, weil sich kleine Füllstoffteilchen in den immer noch verhältnismäßig dicken Schliffen (0,01 bis 0,04 mm) überlagern und damit den Eindruck eines bedeutend größeren Teilchens erwecken können. Lediglich die Beobachtung sehr kleiner Teilchen, wie sie Farbteilchen oder die Beschwerungsmittel im Typ K darstellen, verlangt die Verwendung von Dünnschliffen. Über die optischen Hilfsmittel (z. B. *Hellfeld- und Dunkelfeldbeleuchtung, Wahl der Vergrößerung, Photographie und Zeichnung*) siehe S. 260.

## C. Verarbeitung (Formgebung).

### 1. Flüssige, filmbildende Isolierstoffe (Isolierlacke).

Stoffe dieser Art werden meistens — verdünnt mit Lösungsmitteln — im Tauchverfahren angewandt (z. B. Tränken von Spulen). Bis jetzt herrscht noch keine Klarheit, welche Eigenschaften maßgebend und

<sup>1</sup> v. SCHWARZ, M.: Bl. Untersuch.- u. Forsch.-Instrum. der Busch AG., Rathenow Bd. 10 (1936) S. 9.

entscheidend für die Verarbeitung sind. Daher haben Prüfverfahren für solche Eigenschaften noch keinen Eingang in deutsche Vorschriften gefunden.

In den französischen Vorschriften sind *Eindringvermögen* (*Penetration*), *Trockendauer* und *Viskosität* berücksichtigt worden.

So geben die französischen Vorschriften (U.S.E. 1937/38—27, S. 900) für **Isolierlacke** (Öllacke und Kunstharzlacke) ein Verfahren zur Bestimmung des *Eindringvermögens* an, das Aufschluß über das Verhalten der Lacke beim Tränken geben soll. Der zu prüfende Lack ist zunächst so vorzubereiten, daß der Gehalt an Lösungsmittel 50 Gew.-% beträgt. In den Lack wird 20 mm tief bei 20° ein röhrenförmiger Docht aus ungebleichter, mit Äther entfetteter und mit kochendem Wasser behandelter Baumwolle getaucht; der Docht hat folgende Kennzeichen:

Breite . . . . .	10 mm	Garnnummer . . . . .	20/1
Fadenzahl . . . . .	40	Maschenzahl/Zoll . . . . .	28
Zwirmung . . . . .	3		

30 min nach dem Eintauchen des Dochtes wird die Steighöhe des Lackes gemessen.

Die Bestimmung der *Trockendauer* ist in den französischen Vorschriften zwar vorgesehen; ein Prüfverfahren ist jedoch erst in Vorbereitung.

Über die zur Bewertung gleichfalls vorgesehene *Viskosität* fehlen Angaben über deren Ermittlung.

## 2. Feste Isolierstoffe.

Die für die Verarbeitung wichtigen Eigenschaften spielen für die Prüfung insofern eine bedeutende Rolle, als auch die Herstellung der Prüfkörper davon zum Teil recht stark beeinflußt wird.

### a) Spangebende Formung.

Für Stoffe, die spangebend verarbeitet werden, waren bereits bei der Ausarbeitung der deutschen Isolierstoffvorschriften VDE 0302 Prüfverfahren zur Beurteilung der *Bearbeitbarkeit* vorgesehen<sup>1</sup>:

1. Zerlegung mit einer rasch laufenden Bandsäge,
2. Bearbeitung mit dem Hobelstahl,
3. Bearbeitung mit Bohrern und Gewindebohrern.

Zu 1. wurde beobachtet: Anzahl der erforderlichen Nachschliffe des Sägenblattes, Verhalten des Materials, Güte der Schnittflächen usw.; zu 2. wurden 580 cm<sup>2</sup> Fläche überhobelt; anzugeben war die Schnittgeschwindigkeit und Spanbreite, die Arbeitszeit, das Nachschleifen des Stahles u. dgl.

<sup>1</sup> PASSAVANT: ETZ Bd. 33 (1912) S. 451.

Verfahren dieser Art sind jedoch nicht in den VDE-Vorschriften aufgenommen worden, da die meisten Stoffe spanlos geformt werden, z. B. Formen mittels Pressen oder Spritzen.

Dagegen haben ähnliche Verfahren Aufnahme in den britischen Vorschriften gefunden (BERA, B/S 1)<sup>1</sup>. Die *Prüfung auf Bearbeitbarkeit* soll nach diesen Vorschriften hauptsächlich mit Rücksicht auf Stoffe wie Hartpapier vorgenommen werden. Als Maß für die Bearbeitbarkeit soll 1. die Abnutzung der Werkzeug-schneide beim Drehen und 2. der Beginn des Ausbrechens des Materials beim Konusdrehen dienen. Drehstahl nach Abb. 9. Material: Silberstahl glashart in reinem, kaltem Wasser gehärtet, auf einem feinen Ölstein abgezogen und nach Winkellehren geschliffen. Probenform: Rohr etwa 370 mm lang, 50 mm Außendurchmesser, 25 mm Innendurchmesser, Schnittlänge: 4 gleiche Schnitte in Form der Schraubenlinie mit einer Gesamtlänge von etwa 490 m. Vor jedem Schnitt soll die Probenoberfläche wieder zylindrisch gedreht werden, damit die Konizität infolge der vorhergehenden Werkzeugabnutzung beseitigt wird. Schnittgeschwindigkeit 30 m/min, Schnitttiefe 0,5 mm; 24 Umdrehungen je 10 mm Drehlänge; Vorschub 0,4 mm.

Zur *Prüfung auf Ausbröckeln* wird nach den britischen Vorschriften Stahl nach Abb. 10 benutzt; sonst wie oben beschrieben. Als Probe dient ein Stab, 125 mm lang, Durchmesser nicht unter 25 und nicht über 50 mm. Die Probe soll vor dem Konusdrehen zylindrisch gedreht werden. Als Maß für das Ausbrechen des betreffenden Materials soll die Tiefe des Schnittes gelten, multipliziert mit dem Durchmesser der Probe an der Stelle, wo das Ausbrechen beginnt. Der Stahl wird nach Abb. 11 eingestellt. Der Versuch wird bei 100 U/min, Vorschub 0,53 mm, Konus 1 : 50, Zimmertemperatur und im allgemeinen trocken ausgeführt.

Diese und ähnliche Prüfungen entsprechen nicht voll den Bedingungen der Praxis, weil heute zum Bearbeiten von Kunststoffen Werkzeug-schneiden aus Wolframkarbid (Widiametall) zur Verfügung stehen, die

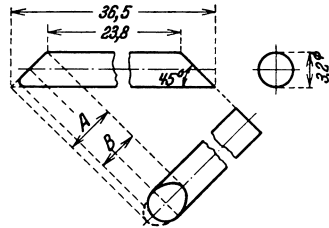


Abb. 9. Drehstahl zur Prüfung auf Bearbeitbarkeit von Isolierstoffen (BERA, B/S1). A Länge der Schneidfläche vor dem Versuch; B Länge der Schneidfläche nach dem Versuch; A-B Abnutzung als Maß der Bearbeitbarkeit.

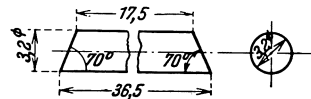


Abb. 10. Drehstahl zur Prüfung auf Ausbröckeln (BERA, B/S1).

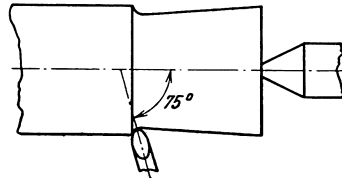


Abb. 11. Anstellwinkel des Drehstahls zur Prüfung auf Ausbröckeln (BERA, B/S1).

<sup>1</sup> BERA: The British Electrical and Allied Industries Research Association, London SW 1.

in der Härte dem Diamanten nahestehen, sehr viel größeren Vorschub zulassen als Schnelldrehstahl oder gar Silberstahl und sehr viel geringere Abnutzung zeigen.

### b) Spanlose Formung.

Voraussetzung für spanlose Formung ist ausreichende Plastizität, wobei unter Plastizität Bildsamkeit, Formbarkeit zu verstehen ist. Ein Körper ist plastisch, wenn durch äußere Kräfte eine neue *bleibende* Gestalt des Körpers erzwungen werden kann; nach Aufhören der Einwirkung der äußeren Kräfte bleibt die neue Gestalt erhalten.

Alle festen Isolierstoffe, die sich leicht formen lassen und zugleich im fertigen Erzeugnis zweckentsprechende Eigenschaften aufweisen, werden bevorzugt angewandt, da ihre Verarbeitung wirtschaftlicher als die sonst ebenbürtiger Isolierstoffe ist, die spangebend verarbeitet werden müssen. Den Verfahren, die die *Formbarkeit* oder *Plastizität* zu messen gestatten, kommt daher besondere Bedeutung zu, und zwar nicht nur für den Verarbeiter vom wirtschaftlichen Standpunkt, sondern auch für den Prüftechniker, da von der Plastizität vielfach auch die späteren Eigenschaften des Fertigstückes abhängen. Bei der folgenden Übersicht sind nur die Verfahren für solche Isolierstoffe erwähnt worden, deren Verarbeitung vorwiegend nicht beim Erzeuger durchgeführt wird, die also meist als formbare Massen in den Handel kommen. Daher sind Verfahren für keramische Massen unberücksichtigt geblieben.

Zu unterscheiden sind:

α) Verfahren für Stoffe, die im plastischen Zustand chemisch im wesentlichen unverändert bleiben („*nichthärtbare Stoffe*“, häufig falsch „*Thermoplaste*“ genannt); ferner *Natur-* und *Kunstkautschuk* und aus ihnen hergestellte Mischungen *vor* der Vulkanisation.

β) Verfahren für Stoffe, die im plastischen Zustand chemische Änderungen erfahren (härtbare Polykondensate).

#### α) Verfahren für Kautschuk und für nichthärtbare organische Kunststoffe.

Zahlreiche Verfahren sind für die verschiedenen Stoffgruppen vorgeschlagen worden, ohne daß eines dieser Verfahren sich endgültig durchgesetzt hätte. So ist auch heute noch umstritten, welches Verfahren am geeignetsten sei zur Messung der *Plastizität von Kautschuk* oder kautschukähnlichen Stoffen. In Betracht hierfür kommen:

a) Plattendruckgeräte, bei denen zwischen zwei parallelen Platten die Probe verformt wird, „Defo“-Gerät (Deformationsgerät der Continental Gummiwerke G. m. b. H., Hannover)<sup>1</sup>, Williams-Plastometer<sup>2</sup>,

<sup>1</sup> BADER, TH.: Kautschuk Bd. 14 (1938) S. 223.

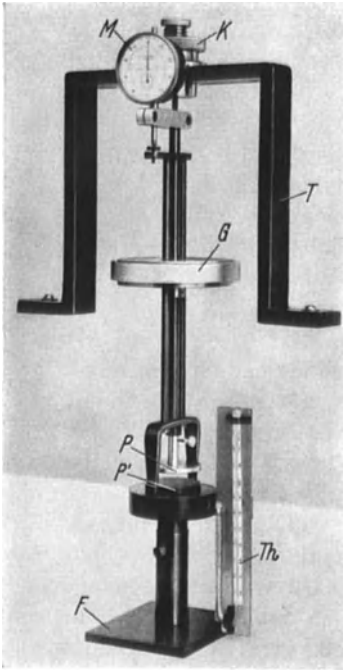
<sup>2</sup> WILLIAMS, J.: Industr. Engng. Chem. Bd. 16 (1934) S. 362.

Scott-Plastometer <sup>1</sup>, Schopper-Plastometer nach HOUWINK <sup>2</sup> (vgl. Abb. 12a und b);

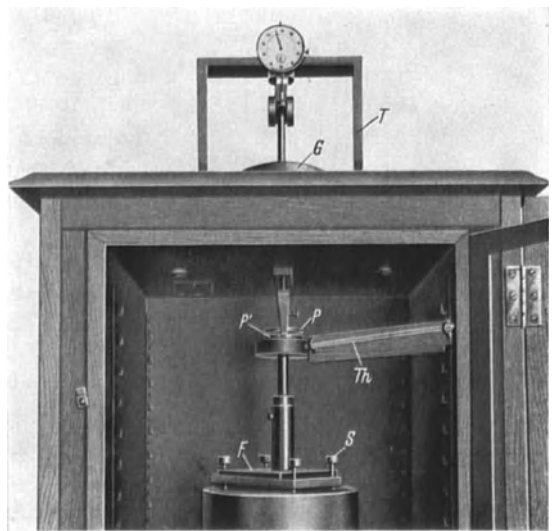
b) Ausflußgeräte, bei denen die Ausflußzeit als Maßstab dient: Marzetti-Apparat <sup>3</sup>, Marzetti-Apparat System BEHRE <sup>4</sup>;

c) Geräte zur Messung der Erweichung von Buna S: Viskosimeter nach HÖPPLER, Shore-Härtemesser, Shore-Härtemesser mit stumpfer Spezialnadel.

HAGEN kommt auf Grund von zahlreichen Untersuchungen zu folgendem Urteil <sup>5</sup>:



a



b

Abb. 12a und b. Schopper-Plastometer nach HOUWINK. a Vor dem Einbau, b in betriebsfertigem Zustand. *PP* planparallele Platten; *G* Belastungsgewicht; *M* Meßuhr; *Th* Termometer; *F* Fußplatte mit *S* Stellschrauben; *K* Einstellvorrichtung für *P*; *T* Tragrahmen. (Aus Z. Kunststoffe 1938, S. 285.)

Bei den **Plattendruckgeräten** zeigte sich als grundsätzlicher Nachteil, daß die exakte Herstellung der Prüfkörper sehr schwierig ist; die Prüfkörperherstellung ist daher die Hauptfehlerquelle. Außerdem ist keine Voraussage über Spritzbarkeit möglich.

Von den untersuchten Plattendruckgeräten hat sich das *Defo-Gerät* als exaktestes Gerät mit größter Meßgenauigkeit, Variationsmöglichkeit und universeller Anwendbarkeit erwiesen, so daß es für Entwicklung und auch für Betriebskontrolle geeignet ist.

<sup>1</sup> Hersteller des Gerätes: H. L. Scott in Providence R. T. USA.

<sup>2</sup> HOUWINK, R. u. PH. N. HEINZE: Kunststoffe Bd. 28 (1938) Heft 11.

<sup>3</sup> MARZETTI: G. Chim. industr. Bd. 5 (1923) S. 342.

<sup>4</sup> BEHRE, J.: Kautschuk Bd. 8 (1932) S. 167. — Kautschuk Bd. 15 (1939) S. 112.

<sup>5</sup> HAGEN, H.: Kautschuk Bd. 15 (1939) S. 88—95.

Bei dem *Williams-Plastometer* ist die Messung der Härte nur in einem engen, mittleren Bereich und ungenauer als bei dem Defo-Gerät möglich; ferner kann die Elastizität (reversible Verformung) nicht gemessen werden, so daß das Gerät nur bedingt zur Betriebskontrolle brauchbar ist.

Das *Scott-Plastometer* entspricht in seiner Brauchbarkeit etwa dem Williams-Plastometer, doch lassen sich die Härtemessungen genauer durchführen. Daher ist das Gerät auch zur Kontrolle der thermischen Erweichung von Buna S geeignet.

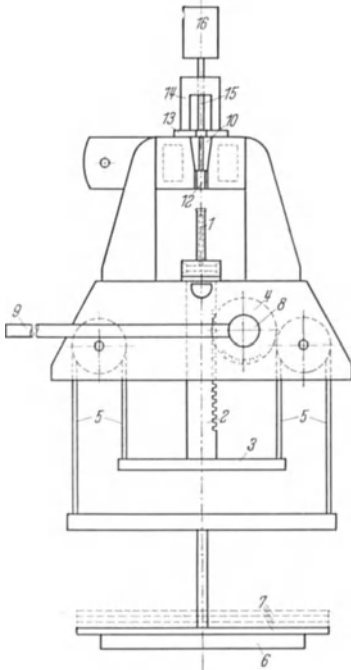


Abb. 13. Schematische Darstellung des „Olsen-Bakelite-Fließprüfgeräts“.  
(Aus Bakelite-Post, März 1938.)

Bei dem *Schopper-Plastometer* ist die Messung der Erholung möglich, aber ungenauer als bei Defo, so daß das Gerät als bedingt brauchbar für die Mischungsentwicklung und Betriebskontrolle, als brauchbar zur Kontrolle der thermischen Erweichung bezeichnet wird.

Die **Ausflußgeräte** haben gegenüber den Plattendruckgeräten den Vorteil, daß die Herstellung der Prüfkörper einfacher ist und die Meßdrucke mehr denen des Betriebes angepaßt sind. Doch ist zu berücksichtigen, daß nicht die Plastizität, sondern hauptsächlich die Gleitkräfte zwischen Düse und Probe gemessen werden, so daß die Geräte nur für die Untersuchung von Spritzmischungen bedingt geeignet sind.

Bei der Untersuchung der *Marzetti-Geräte* kommt HAGEN zu dem Schluß, daß die Geräte zur Mischungsentwicklung kaum, zur Betriebskontrolle zur Messung der thermischen Erweichung von Buna und zur Beurteilung der Spritzfähigkeit nur bedingt brauchbar sind.

Unter den Geräten zur Messung der thermischen Erweichung von **Buna S** hat sich das *Viskosimeter nach HÖPPLER* nur als bedingt geeignet erwiesen, da Buna S nur in sehr engem Meßbereich genügende Löslichkeit besitzt. Die Bestimmung der bei der thermischen Erweichung möglichen Verharzung ist exakter als nach allen anderen Verfahren, da die Viskosität mit zunehmender Verharzung stark ansteigt.

Der *Shore-Härtemesser* ist nur behelfsmäßig brauchbar, da unter anderem die Messungen im Vergleich zu den übrigen Geräten am ungenaueren sind. Der *Shore-Härtemesser mit stumpfer Spezialnadel* gestattet die Messung auch weicher Qualitäten, so daß zum Unterschied



vom normalen Shore-Härtemesser auch weiche Buna-Sorten selbst bei höheren Temperaturen gemessen werden können. Außerdem ist die Meßgenauigkeit größer.

Da das Urteil über die verschiedenen Geräte jedoch noch nicht einheitlich ist, ist hier darauf verzichtet worden, Einzelheiten über die Geräte und Verfahren selbst zu bringen.

Für die Bestimmung der **Plastizität nichthärtbarer Kunststoffe** (*Polymerisate*) dürfte nach Untersuchungen von PENNING und MEYER<sup>1</sup> der

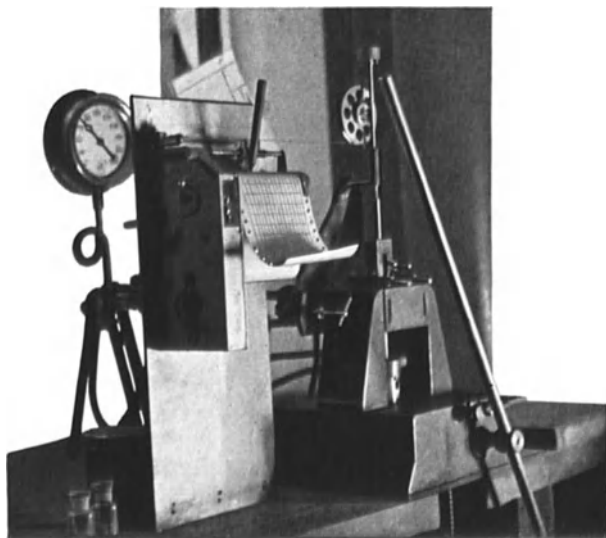


Abb. 14. Olsen-Bakelite-Fließprüfgerät mit Schreibgerät. (Aus Bakelite-Post, März 1938.)

*Olsen-Bakelite-Fließprüfer* geeignet sein (s. S. 46). Das Gerät (vgl. Abb. 13 und 14) besteht im wesentlichen aus einem offenen Fließkanal, in welchen das Material aus einem Füllraum unter bestimmten Bedingungen hineingedrückt wird, wobei der in der Zeiteinheit vom Material zurückgelegte Weg gemessen wird. Die wichtigsten Einzelheiten des Gerätes sind

1. senkrechter Fließkanal ( $D = 3,2$  mm, Länge 38 mm) im längs geteilten Konus 10, der in einem dampfbeheizten Block sitzt,
2. Füllraum 12 ( $D = 9,5$  mm, Länge 19 mm) unmittelbar unter dem Fließkanal,
3. Preßkolben 1, der senkrecht nach oben aus dem Füllraum 12 das Material in den Kanal preßt,
4. Belastungsgewichte 6, 7, die eine Einstellung des Preßdruckes in Stufen von  $7 \text{ kg/cm}^2$  bis zu  $210 \text{ kg/cm}^2$  gestatten,

<sup>1</sup> PENNING, C. H. u. L. A. W. MEYER: Brit. Plast. Bd. 2 (1933) S. 191—196.

5. Schreibgerät zur Aufzeichnung der Weg-Zeit-Kurve. Der Fließvorgang wird auf das Schreibgerät durch einen Stift 15 im Fließkanal übertragen, der beim Fließen von der Masse nach oben geschoben wird,

6. Vorrichtungen zur Regelung und Beobachtung der Temperatur im Füllraum und Fließkanal.

Als Prüfkörper werden Tabletten von 9,5 mm Durchmesser und 9,5 mm Höhe verwendet. In Anbetracht des starken Einflusses von Temperatur und Feuchtigkeit auf das Fließen müssen die Prüfkörper vorher auf bestimmte Temperatur ( $24^{\circ}\text{C} \pm 1,7^{\circ}$ ) und bestimmten Feuchtigkeitsgehalt gebracht werden, am einfachsten durch Trocknen über Chlorkalzium bis zur Gewichtskonstanz. Die Prüfkörper werden in den geheizten Füllraum gesetzt und sofort ohne Vorwärmen mit  $105\text{ kg/cm}^2$  in den Fließkanal gepreßt. Dabei wird das Fließverhalten nichthärtpbarer Massen, d. h. die Weg-Zeit-Kurve, lediglich durch physikalische Änderungen beeinflusst. PENNING und MEYER maßen zur Kennzeichnung des „Fließvermögens“ den Fließweg in der Zeiteinheit; als Zeiteinheit wurden 2 min gewählt.

Zur Aufstellung einer Klassifizierung nach dem Fließvermögen wurden 6 nichthärtpbare Spritz- und 6 nichthärtpbare Preßmassen verschiedener Weichheit bei 135, 140, 145, 150, 155 und  $160^{\circ}\text{C}$  untersucht. Die Ergebnisse (Abb. 15a) zeigen, daß Spritz- und Preßmassen gemeinsam klassifiziert werden können. Alle nichthärtpbaren Stoffe können durch Temperaturänderung auf gleichen Fluß gebracht werden, sofern vorher keine Zersetzung eintritt. Zur Klassifizierung wird vorgeschlagen, als Kennzeichen die Temperatur zu wählen, bei welcher bei  $105\text{ kg/cm}^2$  Druck

Tabelle 5.

Klassifizierung	Temperatur zur Erzielung gleichen Fließweges		Einreihung handelsüblicher Massen
	in $^{\circ}\text{C}$	in atü (Dampfdruck)	
S <sub>14</sub> weich („soft“)	101,7	0,07	} Spritzmassen
⋮			
S <sub>4</sub> weich („soft“)	129,4	1,68	
S <sub>3</sub> weich („soft“)	132,2	1,89	
S <sub>2</sub> weich („soft“)	135,0	2,17	
S weich („soft“)	137,8	2,45	
MS mittelweich	140,6	2,73	
M mittel	143,3	3,01	} Preßmassen
MH mittelhart	146,1	3,36	
H hart	148,9	3,64	
H <sub>2</sub> hart	151,7	4,06	
H <sub>3</sub> hart	154,5	4,41	
H <sub>4</sub> hart	157,2	4,83	
⋮			
H <sub>14</sub> hart	185,0	10,36	

ein Fließweg von 25,4 mm (1") erreicht wird. PENNING und MEYER kommen auf diesem Wege zu der in Tabelle 5 wiedergegebenen Klassifizierung der nichthärtbaren Stoffe auf Grund des Fließvermögens, in der 31 Klassen mit Temperaturstufen von je 2,8° C vorgesehen sind.

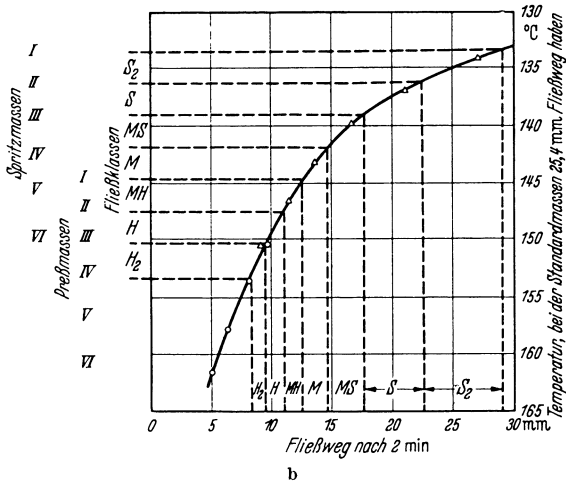
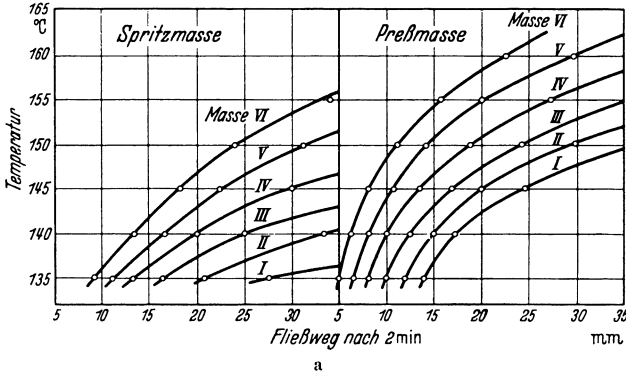


Abb. 15 a und b. Fließvermögen organischer, nicht härtbarer Spritz- und Preßmassen. a Einfluß der Temperatur auf verschiedene Massen. b Zusammenfassende Darstellung zur Klassifizierung nichthärtbarer Massen.

Zur einfachen und schnellen Feststellung, in welche Klasse eine nichthärtbare Masse hineingehört, dient die in Abb. 15 b gegebene Darstellung. Hier sind die in Abb. 15 a dargestellten Kurven zu einer einzigen vereinigt, indem die Fließwege bei nur einer Temperatur (135° C) eingetragen wurden. Ferner wurden die zugehörigen Bereiche für die einzelnen Fließklassen eingetragen. Es genügt daher die Messung des Fließweges einer unbekanntem Masse bei 135° C, um an Hand der Abb. 15 b festzustellen, in welche Klasse die Masse gehört. Da bei härteren Massen

bei 135° C der Fließweg nur klein ist und unter 10 mm Fließweg die Genauigkeit stark abnimmt, ist bei härteren Massen (Klasse H<sub>2</sub>, H<sub>3</sub> und höher) zweckmäßig eine höhere Prüftemperatur zu wählen, bei welcher ein Fließweg von etwa 25,4 mm erreicht wird, und zur Auswertung eine der Abb. 15 b entsprechende Darstellung. Als Mangel der Fließklassifizierung und des beschriebenen Verfahrens ist hervorzuheben, daß verschiedene Massen bei Änderung des Druckes oder der Temperatur sich nicht gleich verhalten. Bei Anwendung höherer Temperaturen und hohen Druckes in der Praxis können also an Hand des Verfahrens irrtümliche Voraussagen gemacht werden. Eine Berücksichtigung sowohl der Temperatur als auch des Druckes würde aber das Verfahren für praktischen Gebrauch zu umständlich machen.

Bei dem *Plastometer* von MOONEY<sup>1</sup> wird das Fließvermögen folgendermaßen bestimmt: Eine Metallscheibe mit gerauhter Oberfläche dreht sich langsam in einer bestimmten Menge des zu untersuchenden plastischen Stoffes, wobei Schlupf vermieden wird. Der Olsen-Bakelite-Fließprüfer hat gegenüber dem Mooney-Gerät zweifellos für den Praktiker den Vorteil, daß nicht nur die Viskosität, sondern auch die für den Spritzvorgang wichtigen Reibungswiderstände der fließenden Masse gegenüber den Wandungen des Fließkanals erfaßt werden.

Hingewiesen sei auch noch auf die Geräte von HOUWINK (*Plastometer*)<sup>2</sup> (s. S. 39), BRABENDER (*Plastograph*)<sup>3</sup> und NOLL<sup>4</sup>, die vielleicht für die Untersuchung nichthärtbarer Kunststoffe Bedeutung gewinnen können.

#### β) Verfahren für härtbare Kunstharz-Preßmassen (Polykondensate).

Verfahren für Stoffe, die im plastischen Zustand chemische Änderungen erfahren (Härtung) sind ebenso wie diejenigen für nichthärtbare Stoffe im Inland noch nicht genormt, obwohl sie von großer praktischer Bedeutung für die Verarbeitung von Kunstharz-Preßmassen aus Phenol- oder Harnstoff-Harzen im Wege des Warmpressens sind. Die Gründe hierfür sind in den verwickelten, sich gegenseitig überdeckenden physikalischen und chemischen Vorgängen beim Pressen zu suchen und in der daraus sich ergebenden Schwierigkeit, eindeutige und klare Begriffe für diese Vorgänge festzulegen. Bei den Kunstharz-Preßmassen ändert sich die Plastizität während des Pressens: Unter dem Einfluß der Wärme wird die Preßmasse zunächst plastisch, da sie erweicht, und anschließend hart, da sie chemisch verändert wird (Fortschreiten der Kondensation zu hochmolekularen Verbindungen). Um die Verarbeit-

<sup>1</sup> MOONEY, M.: *Industr. Engng. Chem.* Bd. 6 (1934) S. 147.

<sup>2</sup> HOUWINK, R.: *Z. Kunststoffe* Bd. 28 (1938) Heft 11.

<sup>3</sup> SPEITMANN, M.: *Chemiker-Ztg.* Bd. 61 (1937) S. 415.

<sup>4</sup> NOLL, M.: *Papierfabrikant* Bd. 35 (1937) S. 365.

barkeit solcher Massen zu kennzeichnen, haben sich Begriffe wie *Fließvermögen*, *Härtungsvermögen*, *Schließzeit* herausgebildet, ohne daß es bisher zur Abgrenzung dieser sich überschneidenden Begriffe und zur Schaffung einheitlicher Prüfverfahren gekommen wäre. So versteht man unter *Fließvermögen* die Fähigkeit der während des Preßvorganges bildsamen Masse, in alle Teile der Form hineinzufließen. Diese Kenngröße kann nicht durch Plastizitätsmessungen bestimmt werden, da bei den hohen Verarbeitungstemperaturen die Härtung ständig fortschreitet und die anfangs rasch fließende Masse schließlich infolge Erhärtung zum Stillstand kommt. Die Zeit, die sie dafür benötigt, die *Härtungszeit*, ist eine weitere wichtige Kenngröße der Preßmassen, aus der sich auch zugleich die Härtungsgeschwindigkeit als die Geschwindigkeit der chemischen Umwandlung des ursprünglich schmelzbaren Harzes zu einem unschmelzbaren hochmolekularen Körper, sowie das *Härtungsvermögen* ergibt. Ferner ist für die Verarbeitung die *Schließzeit* wichtig. Man versteht darunter die Zeit, die für das Erweichen der Masse und zum vollständigen Schließen der Form erforderlich ist. Die Schließzeit hängt demnach nur teilweise mit dem Fließvermögen zusammen; sie ist keineswegs ohne weiteres durch das Fließvermögen gegeben, da eine Masse zwar gut fließen, aber schwer erweichen kann und umgekehrt.

Zur Bestimmung des *Fließvermögens* sind zahlreiche Versuchsanordnungen gegeben worden. Bei der einen Gruppe der Verfahren wird im *offenen* Platten-Werkzeug eine bestimmte Menge Masse unter bestimmten Preßbedingungen zu einer flachen Scheibe ausgepreßt; die Dicke der Scheibe ist hierbei das Maß für das Fließvermögen („Fließzahl“, „Fluß“). Diese Verfahren sind zwar sehr einfach in der Handhabung, aber geben ein nur unzureichendes Bild über die Fließeigenschaften, zumal der Preßdruck nicht konstant ist und ein Einblick in das Fließen in Abhängigkeit von der Zeit (Weg-Zeit-Diagramm) nicht zu erhalten ist. So kommt es häufig vor, daß zwei Massen, die bei der Prüfung nach diesen Verfahren gleiche Fließeigenschaften zeigen, sich in der Praxis unter andersartigen Preßbedingungen stark unterschiedlich im Fluß verhalten können. Dennoch wird in Deutschland noch vereinzelt nach diesen Verfahren gearbeitet, da die Prüfung einfach und schnell ausführbar ist und wenigstens einen rohen Anhalt gibt.

Bei der zweiten Gruppe der Verfahren wird im *geschlossenen* Werkzeug eine bestimmte Menge Masse (untablettiert oder tablettiert; ohne oder mit Vorwärmung) unter bestimmten Preßbedingungen in einen Kanal gepreßt; die Länge des erhaltenen Fließstabes ist das Maß für das Fließvermögen. Bei diesem Verfahren ist ein unmittelbarer Einblick in den Fließvorgang möglich: entweder durch Unterbrechung des Fließens nach verschiedenen Zeiten oder durch unmittelbare Aufzeichnung der Weg-Zeit-Kurve, sowie durch Variation der Preßbedingungen und der Vorbehandlung der Masse (Vorwärm-Bedingungen). In England und

Frankreich bedient man sich vielfach des Verfahrens nach FORRER<sup>1</sup>, nach welchem die Preßmasse in eine spiralförmige, waagerechte Nut so hineingepreßt wird, daß sie sich von der Mitte aus nach außen durch den spiralförmigen Weg fortbewegt. Je größer der erreichte äußerste Ringdurchmesser ist, desto höher ist das Fließvermögen der Preßmasse. Nach einem Verfahren von AMIGO<sup>2</sup> wird die Masse zu einer stehenden Schraubenlinie ausgepreßt. Die Länge des Weges, bis der Stempel zum Stillstand kommt, ist ein Maß für das unter den gewählten Druck- und Temperaturbedingungen erhaltene Fließvermögen. Um den Grad der erzielten Durchhärtung zu messen, wird die frisch gepreßte Spirale in einem auf Preßtemperatur erwärmten Rohr durch Gewichte belastet, und man mißt nach Entlastung die bleibende Verkürzung. Aus dieser Verkürzung kann man jedoch nur dann auf den Durchhärtungsgrad schließen, wenn die Harzart genau bekannt ist.

Bei dem Verfahren von KRAHL<sup>3</sup> wird die Preßmasse unter bestimmten Druck- und Temperaturbedingungen in einen engen, senkrechten sich nach unten verjüngenden Schacht hineingepreßt (vgl. Abb. 16 a bis c). Der Weg, den die Masse in diesem Fließkanal zurücklegt, bis sie infolge Härtung zum Stillstand kommt, ist ein Maß für das Fließvermögen. Das Härtungsvermögen bestimmte KRAHL früher an halbkugligen Schalen, die sofort nach dem Pressen unter konstanten Bedingungen (500 kg/cm<sup>2</sup>, 165°, 1 min) in einer besonderen Prüfvorrichtung (Abb. 17) belastet wurden, wobei die Durchbiegung des Bodens als Maß für das Härtungsvermögen der Masse benutzt wurde. Meist wird jetzt das Härtungsvermögen so bestimmt, daß man die gepreßten Stäbchen einer Biegeprüfung unterwirft<sup>4</sup>.

Das Verfahren der Bakelite-Gesellschaft<sup>5</sup> mittels des Olsen-Bakelite-Fließprüfers<sup>6</sup> (Abb. 13 und 14), beruht ebenfalls auf dem Einpressen der Masse in einen senkrechten beheizten Kanal, mit dem Unterschied gegenüber dem KRAHL-Verfahren, daß das Ausfließen der (tablettierten) Masse in den Fließkanal eine gewisse Zeit unterbunden werden kann, wodurch eine gewisse Vorhärtung eintritt, durch die wesentlich kürzere Stäbchen entstehen (Abb. 18) und auch der Einfluß des Härtungsvermögens auf das Material erkennbar wird. Da außerdem der Kanal sich nicht verjüngt, sondern zylindrisch ist, läßt sich die Weg-Zeit-Kurve beim Fließvorgang von einem Schreibgerät aufzeichnen; diese Kurve ist charakteristisch für die Preßbedingungen (Abb. 19) und das Harz.

<sup>1</sup> FORRER: Brit. Plast. Bd. 4 (1932) S. 52.

<sup>2</sup> AMIGO: Plast. Massen Bd. 7 (1937) S. 307.

<sup>3</sup> KRAHL: ETZ Bd. 52 (1931) S. 439, 850.

<sup>4</sup> KRAHL: Plast. Massen Bd. 4 (1934) S. 160.

<sup>5</sup> Plast. Massen Bd. 4 (1934) S. 161. — RUPPRECHT, H.: Kunststoffe Bd. 28 (1938) S. 173.

<sup>6</sup> USA-Pat. 2066016 vom 3. 2. 1934 (L. M. ROSSI u. G. L. PEAKES).

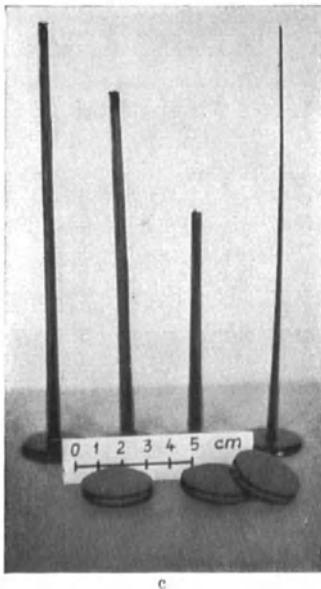
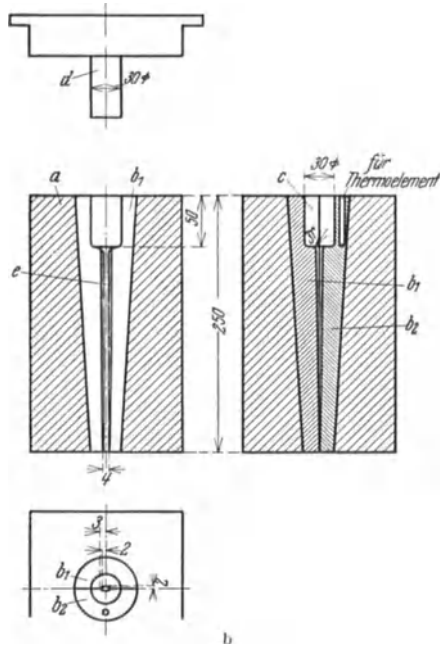
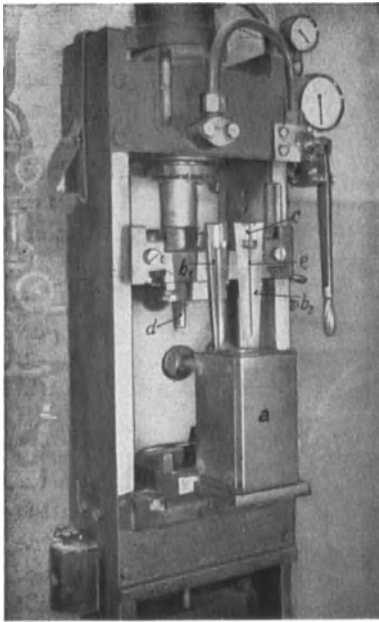


Abb. 16a bis c. Messung des Fließvermögens härtbarer Kunstharz-Preßmassen nach KRAHL. a Anordnung des Prüfwerkzeuges auf der Presse beim Entleeren des Werkzeuges; b Werkzeug (Form) zur Bestimmung des Fließvermögens (a heizbarer Block;  $b_1$ ,  $b_2$  zweiteiliger Konus; c Füllraum; d Oberstempel. e Fließbandl). c Normaltabletten aus Preßmasse und gepreßte Stäbchen. (Aus ETZ 1931, S. 439.)

Die Längen der erhaltenen Stäbchen in Abhängigkeit von den Vorhärtungszeiten ergeben Kurven, aus denen sich die Fließ- und Härteigenschaften der Preßmischungen entnehmen lassen (Abb. 20). Außerdem kann man annähernd als Maß für die Härtezeit die Zeit auswerten, nach der der Fließweg Null geworden ist. Der Erweichungsvorgang wird bei dieser Prüfung grundsätzlich ausgeschaltet, d. h. man bringt die zu prüfende

Masse durch Vorwärmung in der Apparatur bereits vor der Prüfung in ziemlich plastischen Zustand.

Keines der beschriebenen Verfahren hat bisher endgültige Anerkennung gefunden. Am wertvollsten dürften die Verfahren nach KRAHL

und der Bakelite-Gesellschaft sein. Das Verfahren KRAHL hat jedoch noch den Nachteil, daß der eigentliche Fließvorgang (Weg-Zeit-Kurve) nicht unmittelbar gemessen werden kann, da der Fließkanal konisch ist,

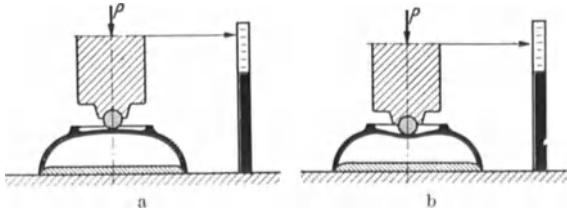


Abb. 17 a und b. Prüfung auf Härtingsvermögen nach KRAHL.  
a vor, b nach dem Versuch.

das Bakelite-Verfahren den Nachteil, daß die inezuhaltenden Preßbedingungen von denen der Praxis abweichen und die anzuwendende Menge (0,685 g bei  $D = 1,35$ ) so gering ist, daß nur feinkörnige Massen geprüft werden können.

In Vorbereitung ist daher für das Reich ein Einheitsverfahren, das die Vorteile beider Verfahren unter Vermeidung der Nachteile vereinigen soll.

Als Ergänzung, zuweilen auch als (völlig unzureichender) Ersatz für die Verfahren zur Bestimmung der Fließ- und Härteigenschaften

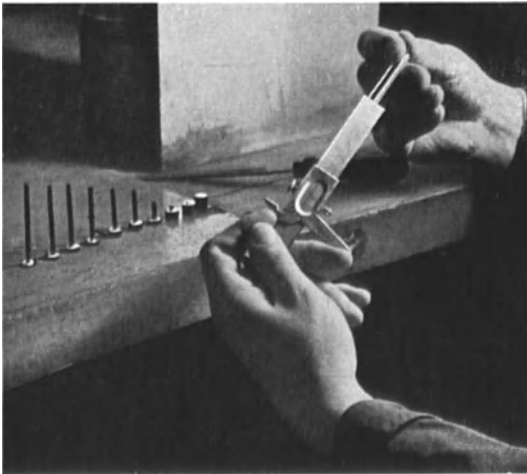


Abb. 18. Prüfstäbchen aus dem Olsen-Bakelite-Fließgerät und Messung der Länge. (Aus Bakelite-Post, März 1938, S. 102.)

dienen die Verfahren zur Bestimmung der *Schließzeit*. Hierbei mißt man beim Pressen eines Gegenstandes (meist Becher) bestimmter Abmessungen die Zeit vom Auftreffen des Oberstempels auf die Preßmasse bis zum vollständigen Schließen der Form. In den britischen Vorschriften für Kunstharz-Preßmassen<sup>1</sup> ist bereits ein Verfahren zur Bestimmung der *Schließzeit* (cup flow test) genormt, nach welchem unter

genau festgelegten Bedingungen und Werkzeugabmessungen (vgl. Original) ein Becher gepreßt wird; gemessen wird die Zeit vom Beginn des Druckanstieges bis zum Aufhören der Stempelbewegung. Diese Zeit liegt bei handelsüblichen Preßmassen bei Anwendung des britischen Verfahrens zwischen 4 und 30 sec.

<sup>1</sup> British Standard Specification for Synthetic resin (Phenolic) Moulding Materials and Moldings, Nr. 177—1938, veröffentlicht von der British Standard Institution, 28 Victoria Street, London SW 1.



Dieses Verfahren hat wie alle Verfahren zur Bestimmung der Schließzeit den Nachteil, daß die Ergebnisse nur Gültigkeit für den gepreßten Gegenstand haben und nicht auf höhere oder niedrigere Gegenstände mit entsprechend anderen Fließwegen der Masse übertragbar sind.

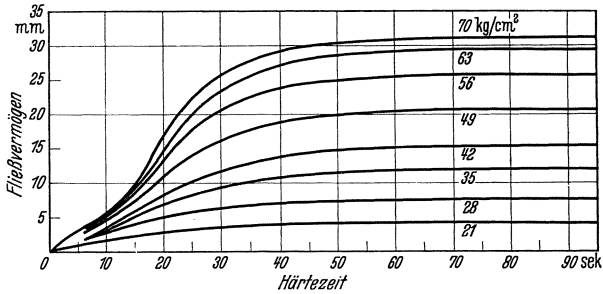


Abb. 19. Weg-Zeit-Kurven bei der Prüfung auf Fließvermögen im Olsen-Bakelite-Fließprüfer in Abhängigkeit vom Preßdruck. (Aus Bakelite-Post, März 1938, S. 104.)

Für die Verarbeitung von Kunstharz-Preßmassen sind ferner Kenntnis des *Schüttgewichtes* und der *Schwindung* von Wert. Hierfür sind gleichfalls in den britischen Vorschriften bereits Verfahren festgelegt<sup>1</sup>.

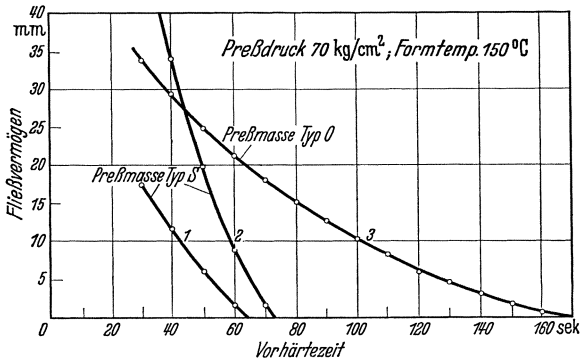


Abb. 20. Einfluß der Vorhärtung auf das Fließvermögen. (Aus Bakelite-Post, März 1938, S. 103.)

Zur Bestimmung des *Schüttgewichtes* werden etwa 120 cm<sup>3</sup> Preßmasse in einen Trichter gegeben, von dem die Masse in einen 100-cm<sup>3</sup>-Meßzylinder (Durchmesser 40 mm) fällt (Abstand der Trichteröffnung von der Zylinderöffnung 38 mm). Die überschüssige Masse wird abgestrichen. Die Masse im Zylinder wird gewogen. Für Preßmassen mit groben Füllstoffen ist das Verfahren nicht anwendbar, da die Trichteröffnung nur 9,5 mm Durchmesser hat.

<sup>1</sup> Vgl. Fußnote 1, S. 48.

Der *Verdichtungsfaktor* (bulk factor) wird aus dem Verhältnis

$$\frac{\text{Spezifisches Gewicht des Preßlings}}{\text{Schüttgewicht der Preßmasse}}$$

bestimmt.

Alle Preßteile aus härtbaren Kunstharzen schwinden; d. h. nach dem Pressen und Abkühlen sind sie kleiner als in der Form. Die Größe der Schwindung hängt unter anderem ab von der Harzart, der Vorbehandlung der Preßmasse (Vorwärmen verringert die Schwindung), den Preßbedingungen und der Gestalt des Preßlings, insbesondere von der Dicke. Die Messung der Schwindung ist zwar einfach; bei Berücksichtigung der aufgezeigten Einflüsse ist jedoch die Festlegung eines Verfahrens schwierig. In den britischen Vorschriften<sup>1</sup> ist ein Verfahren beschrieben, das jedoch nur einen kleinen Ausschnitt der praktischen Verhältnisse erfaßt.

Die *Schwindung* wird hiernach an 3,2 mm dicken Scheiben mit 102 bis 127 mm Dmr. bestimmt. Die Scheiben werden bei 158 bis 315 kg/cm<sup>2</sup> Preßdruck, 154,4° ± 0,6° Preßtemperatur 6 min gepreßt und dann an der Luft abgekühlt. Zur Berechnung der Schwindung wird der Durchmesser des kalten Preßstückes von dem des kalten Werkzeuges abgezogen und die Differenz durch den Durchmesser des kalten Werkzeuges geteilt. Die wichtige Angabe, nach welcher Kühlzeit das kalte Preßstück gemessen werden soll, fehlt in den britischen Normen.

## D. Physikalisches und chemisches Verhalten.

### 1. Prüfkörper.

#### a) Probenformen.

Für die Prüfung von Isolierstoffen auf ihr physikalisches und chemisches Verhalten sehen die Vorschriften der verschiedenen Länder Probenformen vor, die meist willkürlich in ihren Abmessungen festgelegt worden sind und sich daher je nach dem Ursprungsland und je nach dem Verwendungszweck voneinander unterscheiden. Die Festlegung auf bestimmte Probenformen ist an und für sich Voraussetzung für die Prüfung, da an verschiedenen Prüfstellen nur dann übereinstimmende Ergebnisse erzielt werden können, wenn die gleiche Probenform verwendet wurde.

Abb. 21 zeigt einige im Deutschen Reich für die Prüfung von Kunstharz-Preßstoffen vorgesehenen Prüfkörper und Abb. 22a und b zwei Sonderprüfkörper, die besonders zur Ermittlung der Werkstoffeigenschaften am Fertigstück mittels des Dynstat-Gerätes (s. S. 200, 206, 213)

<sup>1</sup> Vgl. Fußnote 1, S. 48.

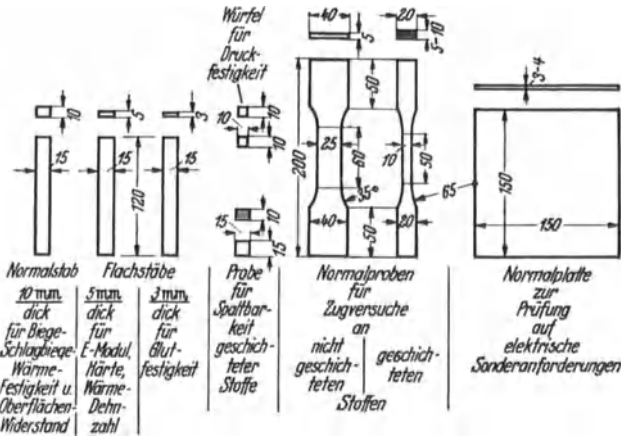


Abb. 21. Normal-Prüfkörper zur Prüfung von Kunstharz-Preßstoffen nach VDE 0302, 0318 und DIN 7701.

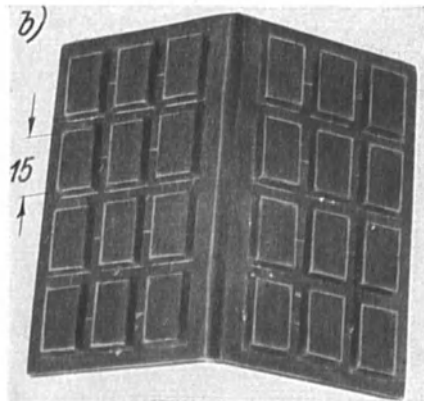
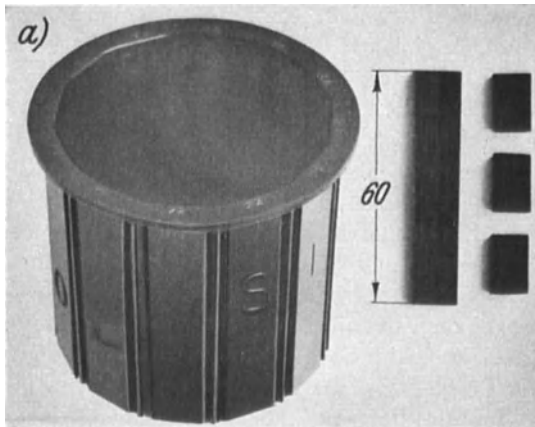


Abb. 22a und b. Sonderprüfkörper zur Prüfung am Dynstat-Gerät. a Rippenbecher nach SCHOB; b Dynstat-Tafel nach PINTEN. Aus den Prüfkörpern werden für die Prüfung  $10 \times 15 \text{ mm}^2$  große Proben herausgearbeitet.

geeignet sind. Über die Probenformen für andere Isolierstoffe sowie nach ausländischen Vorschriften sind — soweit notwendig — bei den einzelnen Verfahren nähere Angaben zu finden.

### b) Herstellung.

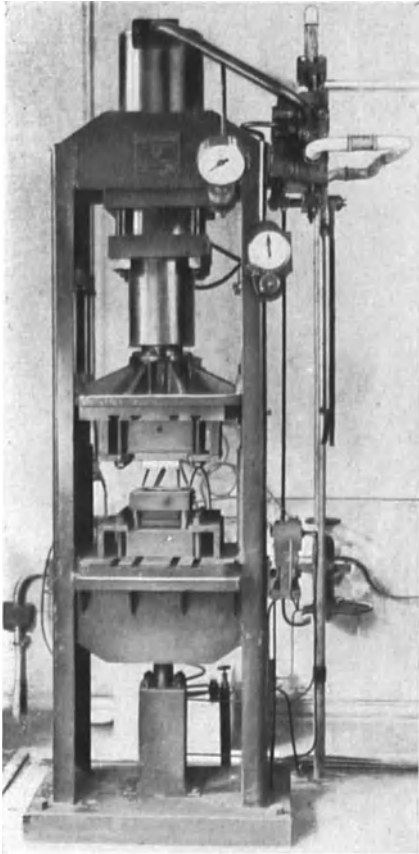
Neben der Probenform, also der Gestalt des Prüfkörpers hat die Art der Herstellung der Prüfkörper starken Einfluß auf das Prüfergebnis, so daß in einigen Vorschriften bereits auch die Herstellung des Prüfkörpers festgelegt worden ist. Dabei ist anzustreben, daß die Herstellungsbedingungen möglichst eng an die gebräuchlichen Herstellungsverfahren der Praxis angelehnt werden, da nur dann aus dem Ergebnis am gesondert hergestellten Prüfkörper auf das Verhalten von Fertigerzeugnissen aus dem betreffenden Isolierstoff geschlossen werden kann. So ist es z. B. unzulässig, aus Eigenschaftszahlen, die an im Spritzverfahren hergestellten Prüfkörpern gewonnen wurden, etwa auf das Verhalten von Fertigerzeugnissen aus dem gleichen Stoff zu schließen, die im Preßverfahren hergestellt wurden. Bei denjenigen Isolierstoffen, bei denen die Gestaltung nach verschiedenen Formungsverfahren möglich und üblich ist, wird in stärkerem Maße als bisher auch die Prüftechnik darauf Rücksicht nehmen müssen und — entsprechend der Praxis — die Herstellung der Prüfkörper regeln müssen, sofern Wert darauf gelegt wird, daß die zu ermittelnden Eigenschaftszahlen über den Wert von Abnahmeprüfungen hinausgehen und die praktische Bewährung voraussagen sollen.

In den deutschen Vorschriften sind die Herstellungsbedingungen für Normalprüfkörper leider noch nicht ausreichend festgelegt. Für die Herstellung von Prüfkörpern aus *Isolier-Preß- und Spritzstoffen* sind im Staatlichen Materialprüfungsamt Berlin-Dahlem versuchsweise verschiedene Werkzeuge im Gebrauch (vgl. Abb. 23 bis 26), wobei unter anderem die Frage noch offen ist, ob dem Einzel- oder dem Mehrfachwerkzeug der Vorzug zu geben ist. Das 6fache Philipswerkzeug (Abb. 23b) wird voraussichtlich nicht für eine Normung in Betracht kommen, da der Preßdruck bei diesem Werkzeug schräg und nicht senkrecht zur  $15 \times 120\text{-mm}^2$ -Fläche wirkt, und da durch die Ausbildung des Ober- und Unterstempels das Fließen stark behindert wird. Dadurch treten bei Preßstoffen mit grobem Gefüge (z. B. Typ T 2) Störungen auf, die eine zuverlässige Prüfung erschweren. So wird bei diesen Stoffen das Fließen erschwert, und die Harzträger erfahren durch die diagonale Anordnung im Werkzeug eine anormale Schichtung.

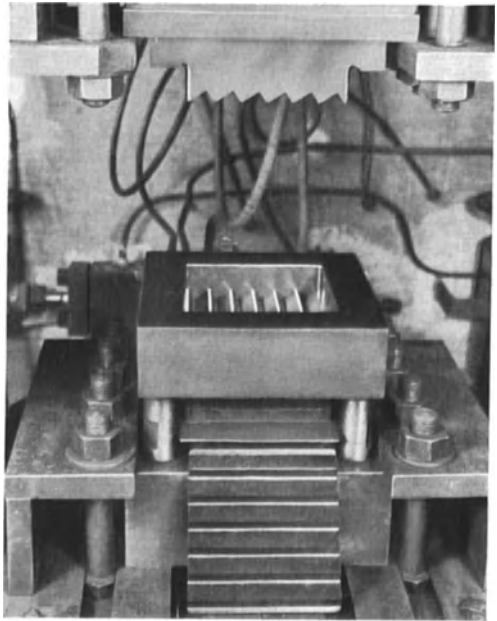
Wesentlich vielseitiger und zuverlässiger in der Handhabung hat sich das Universalwerkzeug nach NITSCHE zur Herstellung von Normalstäben, Flachstäben und Platten erwiesen (Abb. 24a und b). Bei diesem Werkzeug dienen zwei auswechselbare Rippenplatten zur Stabherstellung: die Platte mit 8,5 mm hohen Rippen zur Herstellung eines Satzes von

6 Normalstäben ( $10 \times 15 \times 120 \text{ mm}^3$ ) (in Abb. 24 b im Vordergrund liegend), die Platte mit 3,5 mm hohen Rippen (in Abb. 24 b im Vordergrund schräg stehend) zur Herstellung von Flachstäben. Ohne Rippenplatten eignet sich das Werkzeug zur Herstellung von  $120 \times 120 \text{ mm}^2$ -Platten beliebiger Dicke.

Sofern für bestimmte Stoffgruppen die Herstellungsbedingungen in Vorschriften nicht einheitlich festgelegt sind, müssen die vom



a



b

Abb. 23 a und b. Frühere Herstellung von Normalstäben nichtgeschichteter Kunstharz-Preßstoffe im 6fachen Philipswerkzeug. a Presse mit Werkzeug. b Werkzeug; im Vordergrund ausgebrachter Preßling.

Hersteller angegebenen Bedingungen genau innegehalten werden. Diese Bedingungen sind in den Prüfungsergebnissen stets zu vermerken. Dazu gehören neben den eigentlichen Verarbeitungsbedingungen, wie z. B. Preßdruck, -zeit, -temperatur, auch Angaben über Vor- oder Nachbehandlung des Materials, z. B. Vorwärmen des Materials oder Nachhärten durch thermische Nachbehandlung.

Werden Prüfkörper nicht gesondert hergestellt, sondern spangebend aus Fertigstücken oder Halbzeugen herausgearbeitet, sei es durch Schneiden, Sägen, Fräsen, so ist vor allem darauf zu achten, daß

Erwärmung des Stoffes vermieden wird, die eine Änderung der Stoffeigenschaften bewirken könnte. Kanten und Ecken sind stets sorgfältig

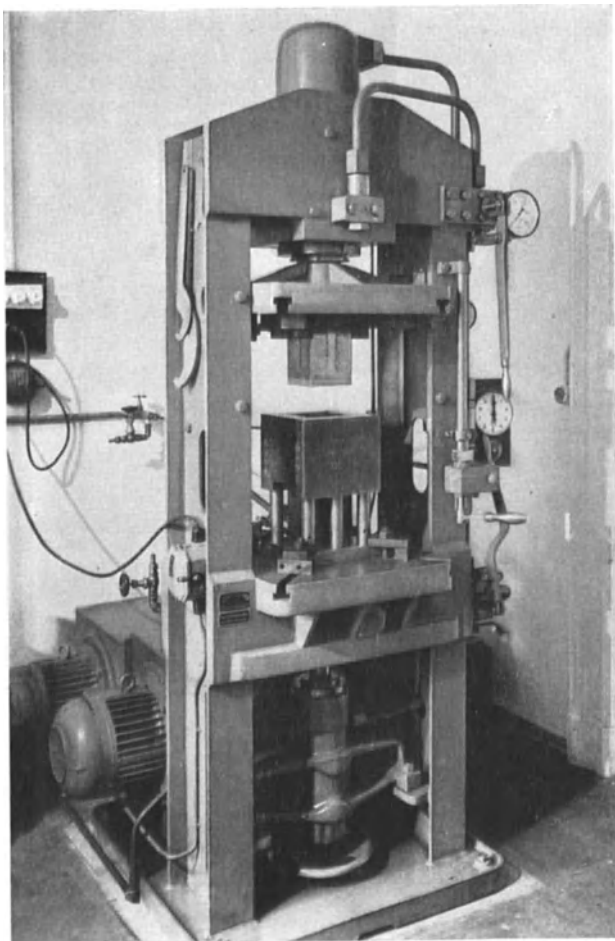


Abb. 24 a und b. Jetzige Herstellung von Prüfkörpern aus Kunstharz-Preßstoffen im Universalwerkzeug nach NITSCHE. a Presse mit 2 Pumpen (ein- und zweistufig) zur stufenlosen Regelung von 1,5 bis 60 t; b Universalwerkzeug zur Herstellung von Normalstäben, Flachstäben und Platten.

zu glätten, wobei es gleichgültig ist, ob der Prüfkörper spanlos oder spangebend geformt wurde.

Die amerikanischen Vorschriften für *keramische Isolierstoffe*<sup>1</sup> enthalten einige Angaben über die Probenherstellung.

Bei *naß aufbereiteten* keramischen Stoffen werden die Prüfkörper aus einem Strang hergestellt, der im Strang-Preßverfahren aus der Masse

<sup>1</sup> A.S.T.M. D 116—34.

geformt wird. Ausschnitte aus dem Strang werden nach genügendem Trocknen zu der gewünschten Probenform unter Berücksichtigung der Schrumpfung geformt. Während des Brennens ist darauf zu achten, daß die Probenachse völlig gerade bleibt.

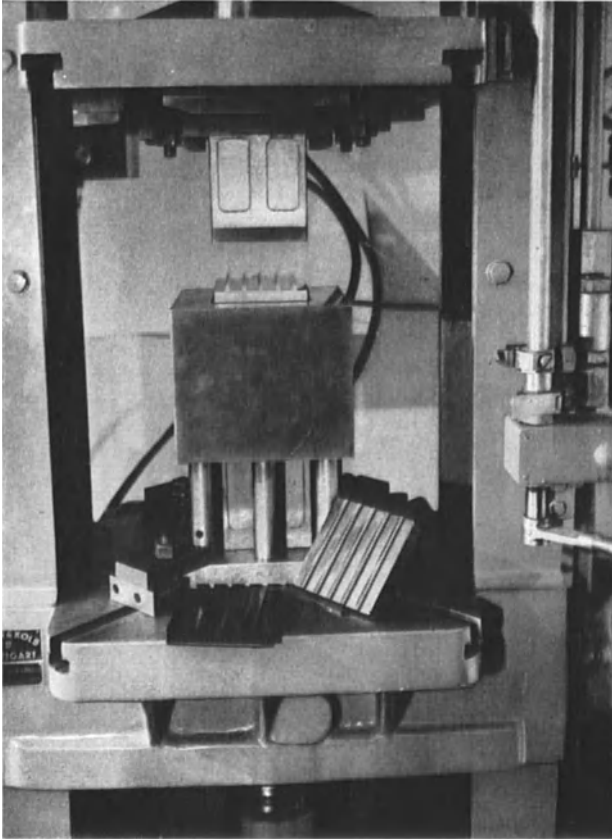


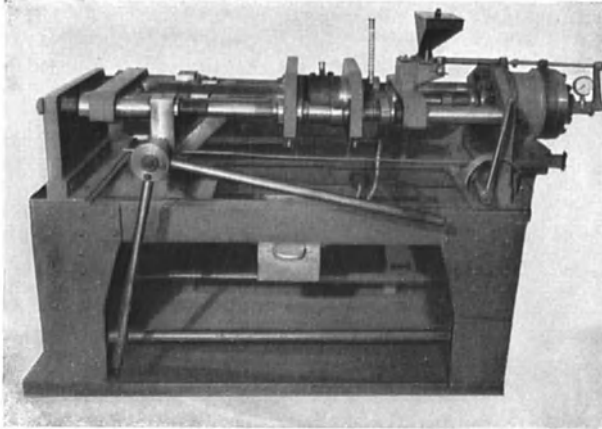
Abb. 24 b.

Bei *trocken aufbereiteten* keramischen Stoffen werden die Prüfkörper in Metallformen unter Berücksichtigung der Schrumpfung gepreßt.

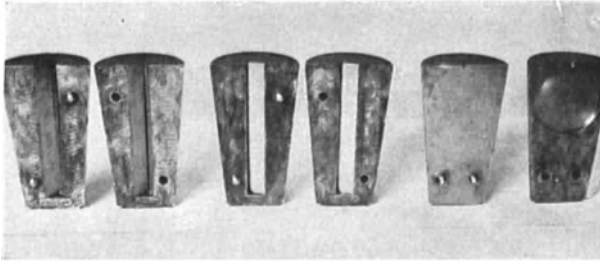
Bei *Gieß-Porzellan* werden die Prüfkörper in Gipsformen unter Berücksichtigung der Schrumpfung gegossen. Mit Ausnahme des Gußansatzes darf von dem Gußkörper nichts entfernt werden.

Die französischen Vorschriften<sup>1</sup> sehen für *Isolierpreßstoffe* folgende Probenherstellung vor: Als Probekörper wird für mechanische und thermische Prüfungen ein  $15 \times 15 \times 200 \text{ mm}^3$  großer Stab verwendet, der im

<sup>1</sup> U.S.E. 1937/38, 46—II.

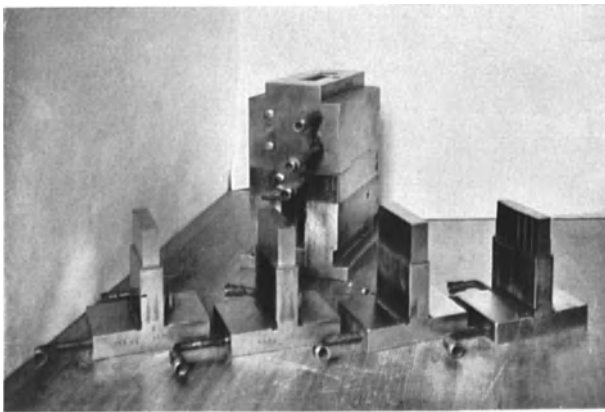


a



b

Abb. 25 a und b. Herstellung von Prüfkörpern aus Spritzstoffen (z. B. nichthärtbaren Kunststoffen).  
 a Spritzgußmaschine mit eingebautem Werkzeug; b Werkzeuge zur Herstellung von Prüfkörpern.  
 1. Normalstab,  $10 \times 15 \times 120 \text{ mm}^3$ ; 2. Flachstab,  $5 \times 15 \times 120 \text{ mm}^3$ ; 3. Scheibe, 3 mm dick, 60 mm Dmr.



a b c d

Abb. 26. Universal-Preßwerkzeug nach NITSCHER zur Herstellung von kastenförmigen Prüfkörpern  
 verschiedener Wandgestaltung a, b, c, Wände glatt. a 2 mm, b 3 mm, c 4 mm dick;  
 d Wände treppenförmig, Dicke von 1 bis 4 mm.



Preßwerkzeug nach Abb. 27 herzustellen ist, um keine bevorzugten Flächen zu erhalten. Nach dem Pressen dürfen die Stäbe nicht nachbehandelt werden. Aus Preßteilen herausgeschnittene Stäbe dürfen nicht verwendet werden. Für die Schlagprüfung wird ein halber Stab ( $15 \times 15 \times 100 \text{ mm}^3$ ) verwendet.

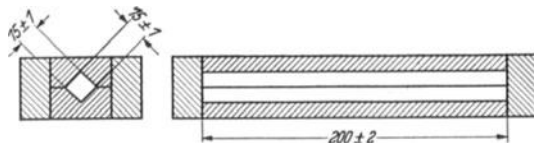


Abb. 27. Schema des Preßwerkzeuges zur Herstellung von Normalstäben nach den französischen Vorschriften. (Aus Normalisations, Spécifications et Règles techniques établis par L'union des Syndicats de l'Electricité 1937/38, U.S.E. 46 II.)

Für elektrische und chemische Prüfungen sowie für Wasseraufnahme ist eine im Preßverfahren herzustellende quadratische Platte ( $100 \pm 2 \text{ mm}$  Kantenlänge,  $3 \pm 0,25 \text{ mm}$  Dicke) vorgesehen.

### c) Vorbehandlung vor der Prüfung.

In Anbetracht der Wirkung von Feuchtigkeit und Temperatur auf die Isolierstoff-Eigenschaften ist die Festlegung einheitlicher *Vorbehandlungen vor der Prüfung*, ähnlich wie bei Papier, Leder, Textilien notwendig. Diese Forderung ist bei den britischen und deutschen Vorschriften bereits zum Teil gewürdigt worden. So fordern die B.S.S. (British Standard Specification for Molded Insulating Materials) eine mindestens 18stündige Probenlagerung bei 75% relativer Feuchtigkeit und  $20^\circ \pm 5^\circ$  vor der Prüfung; die B.E.R.A. (British Electrical Research Association) hat neuerdings<sup>1</sup> — je nach dem Verwendungszweck — verschiedenartige Vorbehandlungen vorgeschlagen, die an Isolierstoffen vor Prüfung der elektrischen Eigenschaften anzuwenden sind; berücksichtigt sind bei den Vorschlägen Feuchtigkeit, Temperatur und Zeit der Vorbehandlung. Für die Prüfung *organischer Isolierstoffe* hat sich in Deutschland noch keine einheitliche Probenvorbehandlung herausgebildet.

### d) Werkstoffprüfung oder Gebrauchsprüfung?

Prüfstäbe, die z. B. aus Kunstharz-Preßmassen in Mehrfachformen hergestellt werden, ergeben bei Massen mit feinpulvrigen Füllstoffen oder feingeschnitzelten Harzträgern häufig ungünstigere Werte als solche in Einzelformen hergestellte, desgleichen sind die mechanischen Festigkeitswerte, die am 10 mm dicken Stab ermittelt werden, oft ungünstiger als die an dünneren Stäben ermittelten Werte. Das ist eher ein Vorteil als ein Nachteil, sofern man sich bei der Prüfung auf *eine* Prüfkörperform beschränkt; denn die Prüfung soll unter anderem eine sichere Grundlage

<sup>1</sup> Directions for the Study of Hard Composite Dielectrics (Moldings, Sheets and the Like). J. Inst. electr. Engrs. Jap. Suppl. Bd. 81 (1937) S. 553—564.

für die Anwendung sein. Es wäre also grundverkehrt, Normalproben zu verwenden, die recht günstige Werte ergeben. Die Normalproben sollen im Gegenteil so gestaltet sein, daß sie möglichst Eigenschaftswerte ergeben, die am fertigen Konstruktionsteil überboten werden. Nur so kann die Prüfung an Normalproben eine sichere Grundlage bieten. Zum Beispiel erfüllt der Normalstab, aus Preßmassen hergestellt, bei den meisten Stoffen diese Forderung und besonders der in der Sechsfachform hergestellte Normalstab. Eine charakteristische Ausnahme bilden die Normalstäbe aus Typ T 3 und Z 3 mit schichtartigem Aufbau, bei denen dieser Aufbau besser erhalten bleibt als bei den meisten anderen Formkörpern, so daß hier die Normalstabwerte häufig günstiger sind als am fertigen Konstruktionsteil ermittelten Stoffwerte.

Man hat in den letzten Jahren wiederholt geäußert, die Prüfung an Normalkörpern sei überholt, die Werkstoffprüfung am fertigen Stück käme allein in Betracht. Diese Auffassung ist einseitig. Wenn man verschiedene Stoffe der gleichen Gruppe, z. B. die Kunstharz-Preßstoffe, nur am fertigen Stück prüfen wollte, so wäre man wohl oder übel gezwungen, unter den zahlreichen Fertigstücken ein besonders geeignetes Fertigstück, z. B. einen Becher, eine Kappe, ein Gehäuseteil oder sonst irgend etwas herauszugreifen, müßte zur einheitlichen Prüfung dieses Fertigstück normalisieren und hätte dann wieder einen Normalkörper, der gegenüber dem Normalstab den Fehler aufweisen könnte, günstigere Werte zu ergeben. Damit wäre aber eine Sicherheitsgrundlage für die Praxis nicht gegeben. Man macht dem Normalstab den Vorwurf, er habe Mindestabmessungen, die in der Praxis nicht vorkommen. Es stimmt zwar, daß die Mehrzahl aller Preßteile aus ungeschichteten Stoffen dünner ist als 10 mm und daher im allgemeinen bessere Stoffwerte aufweist. Es stimmt auch, daß die meisten Fertigstücke in Betracht der anderen Abmessungen auch gegenüber dem Normalstab abweichende Preßbedingungen verlangen; aber die Prüfung muß auch Rücksicht nehmen auf ungünstig liegende Fälle der Praxis, soll nicht die Sicherheit, die durch die Prüfung gewonnen wird, verlorengehen.

Damit soll nicht gesagt werden, die Prüfung an Normalkörpern sei die allein richtige. Notwendig ist dreierlei:

1. Werkstoffprüfung am Normalstab und am fertigen Stück, um die Abhängigkeit der Stoffeigenschaften von der Form und Gestalt kennenzulernen. (Diesem Zweck dient z. B. das in Abb. 26 gezeigte Werkzeug zur Herstellung von Kästen mit den Außenabmessungen  $30 \times 60 \times 120$  mm, Wanddicken von 2, 3, 4 mm und treppenförmig abgesetzten Wänden von 1 bis 4 mm Dicke, s. S. 264.)

2. Prüfung nicht nur in einem Zustand, sondern in mehreren Zuständen, um die Abhängigkeit der Stoffeigenschaften von äußeren Einflüssen, wie Temperatur, Feuchtigkeit usw., ferner bei Schlagversuchen von der Schlaggeschwindigkeit usw. kennenzulernen.

3. Prüfung der aus Isolierstoff hergestellten Konstruktionen unter betriebsmäßigen oder betriebsähnlichen Beanspruchungen (Gebrauchsprüfung).

Die Erfüllung dieser drei Forderungen erfordert zwar sehr viele zeitraubende Prüfungen, aber gerade bei neuentwickelten Stoffen muß dieser mühselige Weg gegangen werden, will man unliebsame Überraschungen vermeiden.

Im folgenden konnte auf die unter 3. aufgeführten Gebrauchs- oder Geräteprüfungen nicht näher eingegangen werden, da die Zahl der möglichen Prüfungen mit der Zahl der Geräte wächst<sup>1</sup>. Daher sind hauptsächlich nur die an Normalkörpern auszuführenden Werkstoffprüfungen behandelt worden.

## 2. Elektrische Prüfungen.

### a) Allgemeines.

Für die Verwendung von Werkstoffen als elektrische Isolierstoffe ist die Kenntnis der elektrischen Eigenschaften die wichtigste Voraussetzung; selbst die hervorragendsten mechanischen, thermischen, chemischen und optischen Eigenschaften würden einen Werkstoff mit schlechten elektrischen Eigenschaften von der Verwendung als Isolierstoff ausschließen. Umgekehrt verlangt man jedoch von einem Isolierstoff, daß er neben hervorragenden elektrischen Eigenschaften auch noch gute sonstige Eigenschaften aufweist; wenn diese fehlen, müssen durch geeignete Konstruktionen die gefährdeten Isolierteile mechanisch entlastet, thermisch geschützt und vor chemischen und sonstigen Angriffen gesichert werden.

Da den elektrischen Eigenschaften für die Isolierstoffe eine ausschlaggebende Bedeutung zukommt, soll mit den Verfahren für die Ermittlung dieser Eigenschaftswerte begonnen werden. Im folgenden sind jedoch nicht möglichst alle in der Literatur einmal beschriebenen Verfahren mit einem Hinweis auf die Literaturstelle so kurz beschrieben, daß der Leser, wenn er ein Verfahren anwenden will, gezwungen ist, auf die Originalliteratur zurückzugreifen, sondern es sind die wichtigsten Meßmethoden, die sich in der Praxis auf Grund ihrer Einfachheit, Zweckmäßigkeit und Genauigkeit bewährt haben, so ausführlich beschrieben und erläutert, daß die Versuche in jedem Laboratorium danach ausgeführt werden können. Dabei werden auch gewisse Hinweise auf das außer der eigentlichen Meßanordnung benötigte Zubehör gegeben.

Die Meßverfahren haben teilweise vielfache Abwandlungen erfahren, um die elektrischen Eigenschaften der Isolierstoffe in Fertigerzeugnissen, z. B. Kabeln, Transformatoren u. a., zu erfassen. Auf diese Sondermeßeinrichtungen wird nur in besonderen Fällen eingegangen. Die angegebenen Meßverfahren sind im allgemeinen so, daß sie sich ohne

<sup>1</sup> Vgl. Vorschriftenbuch des Verbandes Deutscher Elektrotechniker.

wesentliche Schwierigkeiten auch auf die Ermittlung der Eigenschaften von Isolierstoffen, die aus Fertigteilen entnommen wurden, anwenden lassen.

Die elektrischen Eigenschaften werden entweder angegeben als spezifische Stoffeigenschaftswerte, die z. B. auf einen Würfel von 1 cm Kantenlänge bezogen sind wie der spezifische Isolationswiderstand, oder als Verhältniszahlen wie z. B. die Dielektrizitätskonstante. Diese zahlenmäßigen Angaben sind unabhängig von den verschiedenen Meßverfahren; es muß sich also z. B. für die Dielektrizitätskonstante zahlenmäßig derselbe Wert ergeben, unabhängig davon, welche Brückenschaltung — richtige Ausführung der Messung vorausgesetzt — angewandt wird.

Darüber hinaus gibt es elektrische Eigenschaftswerte, die keine spezifischen Stoffwerte darstellen, sondern von dem angewandten Prüfverfahren abhängig sind. Auch diesen Werten kommt Bedeutung zu, da sie meist Eigenschaften erfassen, die für die Verwendung der Stoffe wichtig sind, z. B. der Oberflächenwiderstand, die Kriechstromfestigkeit u. a.

Die Wissenschaft und die Technik sind bemüht, alle Eigenschaften auf spezifische Stoffeigenschaften, deren Zahlenwerte nicht durch das Meßverfahren bedingt sind, zurückzuführen. Solange dies noch nicht in allen Fällen möglich ist, ist der Beschreibung der Meßanordnungen und der Durchführung der Messungen ein breiterer Raum gewidmet, da es hier notwendig ist, die Messungen unter genauer Beachtung der Prüfanweisungen durchzuführen, damit die Ergebnisse verschiedener Meßstellen untereinander vergleichbar sind.

### b) Prüfkörper.

Für die Durchführung aller elektrischen Prüfungen und Ermittlung der Stoffeigenschaften sind ebene Platten von einigen Millimetern Stärke und einer Fläche von  $150 \times 150 \text{ mm}^2$  geeignet. Die üblichen Isolierstoffe sind meist in dieser Plattenform herstellbar. Rohre oder Formkörper sind als solche zu untersuchen, da hier die Eigenschaften durch die Verarbeitung gegenüber den Eigenschaften eines plattenförmigen Werkstoffes verändert sind. Grundsätzlich sind die Eigenschaften der Isolierstoffe an Proben zu ermitteln, die möglichst im gleichen Herstellungsgang wie die späteren Fertigteile gewonnen worden sind, da Unterschiede z. B. in der Brenntemperatur oder Preßdauer die elektrischen Eigenschaften merklich ändern.

An Fertigteilen wird es nur selten möglich sein, ebene Platten der genannten Größe zu erhalten. Die Bestimmung der spezifischen Stoffeigenschaften ist deshalb schwieriger. Die Praxis verzichtet daher oft auf deren Bestimmung und hat für Fertigerzeugnisse andere elektrische, sog. Gebrauchsprüfungen eingeführt. Das Ziel des Isolierstoff-Fachmannes muß jedoch sein, auch an kleinen Proben die spezifischen Stoffeigenschaften zu ermitteln und für diese gewisse Mindestwerte zu fordern.

Für Prüfverfahren, nach denen keine spezifischen Stoffeigenschaften ermittelt werden, ist die Gestalt des Prüfkörpers von Bedeutung. Ihre Form und Größe ist bei der Beschreibung der Meßverfahren angegeben<sup>1</sup>.

Die Erfahrung lehrt, daß für die Durchführung der Prüfungen eine große Zahl gleicher Prüfkörper zur Verfügung stehen soll, damit die Messungen einen Anhaltspunkt über die Schwankungen der Eigenschaftswerte ergeben und die Bildung eines gesicherten Mittelwertes zulassen (vgl. dazu S. 167).

### c) Leitende Belegungen (Elektroden<sup>2</sup>).

Wenn an einem Isolierstoff elektrische Eigenschaften ermittelt werden sollen, ist das Aufbringen von Elektroden auf den Isolierstoff zum Anschluß der Spannung erforderlich. Die Art der Elektroden ist für das Ergebnis der Untersuchung von ausschlaggebender Bedeutung. Benutzt werden 1. aufsetzbare Elektroden, 2. festhaftende, aufgeklebte, aufgespritzte oder eingebraunte Elektroden und 3. aufgegossene flüssige oder nach dem Erkalten erstarrende Elektroden.

Am zweckmäßigsten sind Elektroden, die einen möglichst innigen Kontakt mit der Isolierstofffläche bilden, ohne jedoch den Isolierstoff anzugreifen; mangelhaftes Anliegen der Elektroden bedeutet eine Änderung der elektrischen Feldverteilung und bewirkt besonders bei der Messung der dielektrischen Verluste bei Hochfrequenz und der Durchschlagsspannung Fehlmessungen<sup>3</sup>.

**1. Aufsetzbare Elektroden** sind entweder massive Metallelektroden mit möglichst geschliffenen Flächen oder dünne Bleche aus Nickel oder Platin. Auch Folien werden auf die Isolierstoffe ohne Klebemittel aufgelegt und durch ein Gewicht unter Zwischenlage von Schaumgummi an die Isolierstoffplatte angepreßt. Die Metallfolie kann fest mit dem Schaumgummi verbunden werden, so daß handliche Elektroden jederzeit zur Verfügung stehen. Die Folie kann jedoch auch mit einem Hauch von Paraffinöl auf den Isolierstoff aufgebracht werden. Diese Art Elektroden bilden damit den Übergang zu den am Isolierstoff festhaftenden Elektroden.

**2. Festhaftende Elektroden.** Um bei den Messungen des dielektrischen Verlustfaktors, der im allgemeinen mit einem hohen Grad von Genauigkeit bestimmt wird, nur die im Isolierstoff wirklich vorhandenen Verluste

<sup>1</sup> Über Prüfkörper z. B. für die Ermittlung der Durchschlagsspannung siehe S. 152.

<sup>2</sup> PFESTORF, G.: ETZ Bd. 51 (1930) S. 275. — CHURCHER, DANNATT u. DALGLEISH: J. Instn. electr. Engrs. Bd. 67 (1929) S. 271; Bd. 72 (1933) S. 252.

<sup>3</sup> HARTSHORN, L., W. H. WARD, B. A. SHARPE u. B. J. O'KANE: Der Einfluß der Elektroden auf die Messung der Dielektrizitätskonstanten und des Verlustfaktors von Isolierstoffen in Plattenform. J. Instn. electr. Engrs. Bd. 75 (1934) S. 730, dort auch theoretische Erörterungen.

zu erfassen und reproduzierbare Prüfergebnisse zu erhalten, müssen die Elektroden auf der ganzen Fläche ohne Zwischenschicht unmittelbar am Isolierstoff festhaften. Derartige Elektroden können z. B. durch Versilbern auf chemischem Wege auf Glas, dichtem Porzellan, Paraffin und anderen entfettbaren Stoffen hergestellt werden. Dichtes Porzellan kann außerdem mit eingebrannten Silber- oder Platinbelegungen versehen werden<sup>1</sup>. Vergleichsmessungen mit verschiedenen Elektrodenarten haben gezeigt, daß die Vorbehandlung des Porzellans durch das Einbrennen der Belegung die elektrischen Eigenschaften nicht ändert<sup>2</sup>.

Die Metallelektroden können ferner durch Kathodenzerstäubung auf den Isolierstoff aufgebracht werden<sup>3</sup>. Das Verfahren ist nur zulässig bei solchen Werkstoffen, die auch im Vakuum ihre ursprüngliche Form behalten und durch die erhöhte Temperatur während der Zerstäubung in ihren elektrischen Eigenschaften nicht geändert werden. So werden z. B. manche Glimmerplatten im Vakuum durch die in ihnen enthaltenen Gaseinschlüsse aufgetrieben.

Für die Verkupferung von Porzellan oder Glas ist ein Verfahren mit Kupferwasserstoff (CuH) von Bedeutung<sup>4</sup>. Der Kupferwasserstoff wird durch Reduktion von Kupfersulfat mit unterphosphoriger Säure gewonnen und ist feucht aufzubewahren. Die zu metallisierenden Flächen werden zunächst nach Tauchen in Chromschwefelsäure, Spülen mit Wasser, Abreiben mit Wiener Kalk und nochmaligem Spülen mit einem Pinsel mit dem in wenig Wasser aufgeschlammten Kupferwasserstoff bestrichen. Nach kurzem Trocknen an der Luft werden die so behandelten Platten im Wasserstoff- oder Leuchtgasstrom auf 250 bis 300° zwecks Ausscheidung des Kupfermetalls aus dem Kupferwasserstoff erhitzt. Dieser Vorgang wird einige Male wiederholt, wonach die verstärkte Kupferschicht polierfähig ist.

Die an ein Verfahren zur Erzeugung von leitenden festhaftenden Metallbelegungen auf Isolierstoffen zu stellenden Forderungen: stete Betriebsbereitschaft, schnelle und einfache Herstellung des Metallüberzuges, Bearbeitungsmöglichkeit der Belegung, Aufbringen der Belegung bei normalem Druck, normaler Temperatur und Luftfeuchtigkeit ohne Beschädigung des Isolierstoffes werden bis jetzt am besten durch das Metallspritzverfahren nach SCHOOP erfüllt. Bei diesem Verfahren wird durch die Achse eines Sauerstoffgebläses ein Metalldraht geführt, der

<sup>1</sup> Genaue Angaben über Verfahren zur Versilberung und Platinierung finden sich z. B. bei KOHLRAUSCH: Lehrbuch der praktischen Physik. Leipzig: J. B. Teubner. — ANGERER, E. v.: Technische Kunstgriffe bei physikalischen Untersuchungen, Sammlung Vieweg, H. 71. Braunschweig: F. Vieweg & Sohn.

<sup>2</sup> PFESTORF, G. u. E. F. RICHTER: Phys. Z. Bd. 39 (1938) S. 141.

<sup>3</sup> PFESTORF, G.: Siehe S. 61. Anstatt der Kathodenzerstäubung kann auch die Belegung durch Aufdampfen der Metallschicht hergestellt werden, siehe dazu H. C. BÜRGER und P. H. VAN CITTERT, Z. Physik. Bd. 6 (1930) S. 210 u. 218.

<sup>4</sup> Öst. Chem.-Ztg. Nr. 19 (1937) S. 425—426.

in der kurzen, heißen Stichflamme schmilzt und gleichzeitig durch einen starken Preßluftstrom zerstäubt und abgekühlt auf die Platte gespritzt wird. Der Vorgang erfolgt ohne wesentliche Erwärmung des Prüfkörpers, so daß es sogar möglich ist, ungefährdet einen Strahl gegen die ungeschützte Hand zu richten. Platten, Formkörper und Rohre bis zu etwa 40 mm innerem Durchmesser und 15 cm Länge können nach diesem Verfahren mit einem metallischen Belag versehen werden. Der Spritzapparat besteht aus einem handlichen pistolenähnlichen Körper von etwa 1,5 kg Gewicht. Der Metalldraht wird durch eine kleine Preßluftturbine im Handgriff gleichmäßig vorwärts transportiert<sup>1</sup>.

In besonderen Fällen werden leitende Lack- oder Farbüberzüge aufgespritzt oder aufgepinselt. Sie haben den Vorzug, daß sie ähnlich wie das Metallspritzverfahren das Aufbringen der Elektroden auf beliebige Formkörper gestatten. Sie können jedoch nicht angewandt werden, wenn der Isolierstoff porös ist. Der leitende Lack soll chemisch inaktiv sein. Es werden 2 Lösungen empfohlen: 1. Kolloidales Graphit wird in destilliertem Wasser angerührt (Aquadag)<sup>2</sup>; die Konsistenz soll so sein, daß es mit einem Pinsel aufgetragen werden kann. Der Überzug soll mindestens 1 h an offener Luft trocknen. 2. Nitrozelluloselack wird mit gleichen Teilen eines Lösungsmittels verdünnt und gründlich gemischt. Zu dieser Lösung wird Graphitpulver solange zugesetzt, bis eine Masse erreicht ist, die kaum vom Pinsel tropft. Die Lösung soll unmittelbar vor dem Gebrauch angesetzt werden. Vor dem Beginn der Messungen ist zunächst die Leitfähigkeit der Lackschicht zu prüfen, da oftmals die aufgemalten Graphitelektroden nach vollständiger Trocknung ihre Leitfähigkeit wieder verlieren. Gute Erfolge ergaben die leitenden Lacke der Fa. Beck, Koller & Co., Berlin.

Mit weichem Bleistift (Graphit) können schließlich Elektrodenstriche oder -flächen aufgerieben werden.

**3. Aufgegossene Elektroden.** Leitende Flüssigkeiten, die sich allen Unebenheiten des Prüfkörpers anpassen, dienen als Elektroden. Verträgt der Prüfling erhöhte Temperaturen, so können Elektroden aus Woodchem Metall aufgegossen werden. Dies kommt insbesondere für Formkörper in Betracht.

Welche Elektrodenbelegungen ohne Rücksicht auf die nachfolgend behandelten Elektrodenarten für die verschiedenen Isolierstoffgruppen und für die Ermittlung der elektrischen Eigenschaftswerte sich u. a. als geeignet erwiesen haben und vorwiegend zu benutzen sind, ist in der folgenden Tabelle 6 zusammengestellt.

<sup>1</sup> Die Metallisierungseinrichtungen sind von der Firma Metallisor AG., Berlin-Neukölln, Lahnstr., zu beziehen, die auch selbst Metallisierungsarbeiten als Lohnaufträge durchführt.

<sup>2</sup> CHURCH u. DAYNES: Trans. Inst. Rubber Ind. Bd. 6 (1930) S. 82. — Von der Firma Riedel de Haen, Hannover, ist leitende alkalische Graphitlösung fertig zu beziehen und für viele Isolierstoffuntersuchungen brauchbar.

Tabelle 6.

Isolierstoffgruppe	Durchschlagsspannung bei Raumtemperatur	Spezifischer Widerstand sowie dielektrischer Verlustfaktor und Dielektrizitätskonstante		
		bei Raumtemperatur	bei hohen oder tiefen Temperaturen	bei Hochfrequenz
Natürliche und künstliche Gesteine	Quecksilberelektroden, Blattmetallelektroden	aufgeriebene <sup>1</sup> Blattmetallelektroden, aufgespritzte Metallelektroden	aufgespritzte Zinkelektroden oder Nickelelektroden	
Keramische Werkstoffe, dicht	aufgespritzte Zinkelektroden, eingebrannte Metallelektroden	eingebrannte Platin- oder Silberelektroden, aufgespritzte Zinkelektroden, aufgeriebene <sup>1</sup> Blattmetallelektroden	eingebrannte Platinelektroden oder aufgespritzte Nickelelektroden	eingebrannte Metallelektroden
Keramische Werkstoffe, porös	aufgespritzte Metallelektroden	aufgespritzte Zinkelektroden oder aufgeriebene Blattmetallelektroden	aufgespritzte Nickelelektroden	
Gläser	chemische Versilberung, eingebrannte Elektroden oder auf einen dünnen Auftrag von Bakelitlack aufgespritzte Metallelektroden	auf einen dünnen Auftrag von Bakelitlack aufgespritzte Zinkelektroden, aufgeriebene Blattmetallelektroden, chemisch hergestellte und galvanisch verstärkte Elektroden	Platinelektroden eingebrannt	eingebrannte Platinelektroden
Typisierte Isolierpreßstoffe	aufgespritzte Zinkelektroden, aufgeriebene Blattmetallelektroden oder mit Blattmetall gepolsterte ebene Messingelektroden von 25 oder 50 mm Dmr.	aufgespritzte Zinkelektroden, aufgeriebene Blattmetallelektroden	aufgespritzte Nickelelektroden oder Zinkelektroden	aufgespritzte Nickelelektroden mit Blattmetallpolsterung unter Druck
Hartpapier	aufgeriebene Blattmetallelektroden, eingesetzte Kugelelektroden	aufgespritzte Zinkelektroden, aufgeriebene Blattmetallelektroden	aufgespritzte Zinkelektroden	polierte aufgespritzte Zinkelektroden



Hartgewebe	aufgeriebene Blattmetallelektroden, eingesetzte Kugelelektroden	aufgespritzte Zinkelektroden, aufgeriebene Blattmetallelektroden	aufgespritzte Zinkelektroden	polierte aufgespritzte Zinkelektroden
Preßspan	aufgeriebene Blattmetallelektroden, ebene mit Blattmetall gepolsterte Messingelektroden von 25 bzw. 50 mm Dmr.	desgl.	desgl.	
Fiber	desgl.	„	„	
Kunsthorn	„	„	„	
Gußharz	„	„	„	
Polystyrol	„	„	„	
Hartgummi	„	„	„	
Mischpolymerisate	„	„	„	
Weichgummi und weichgummiähnliche Erzeugnisse wie Kabelmassen, Thiokoll u. a.	aufgespritzte Zinkelektroden, aufgeriebene Blattmetallelektroden, mit Blattmetall gepolsterte Messingelektroden von 25 bzw. 50 mm Dmr.	„	aufgespritzte Metall-elektroden mit massiver Elektrode unter Druck	
Folien Papier	aufgeriebene Blattmetallelektroden, aufgespritzte Lackelektroden, mit Blattmetall gepolsterte Messingelektroden von 25 bzw. 50 mm Dmr.	aufgeriebene Blattmetallelektroden, aufgespritzte Lackelektroden, für stärkere Folien aufgespritzte Zinkelektroden	aufgespritzte Zinkelektroden	
Formkörper, z. B. Isolierschläuche	Metalldorn gegen Drahtwickel	Quecksilberfüllung gegen Blattmetallumwicklung		
Hölzer		aufgeriebene Blattmetallelektroden, aufgespritzte Metallelektroden		

<sup>1</sup> Mit einem Hauch von Paraffinöl auf der ebenen Isolierstoffoberfläche angerieben.

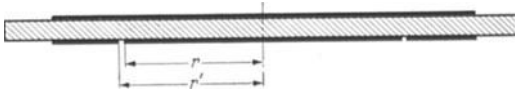


Abb. 28. Thomsonscher Schutzringkondensator.

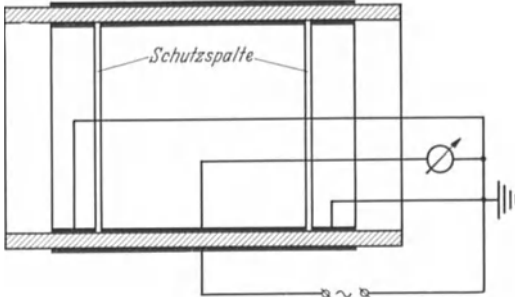


Abb. 29. Zylinderschutzringkondensator.

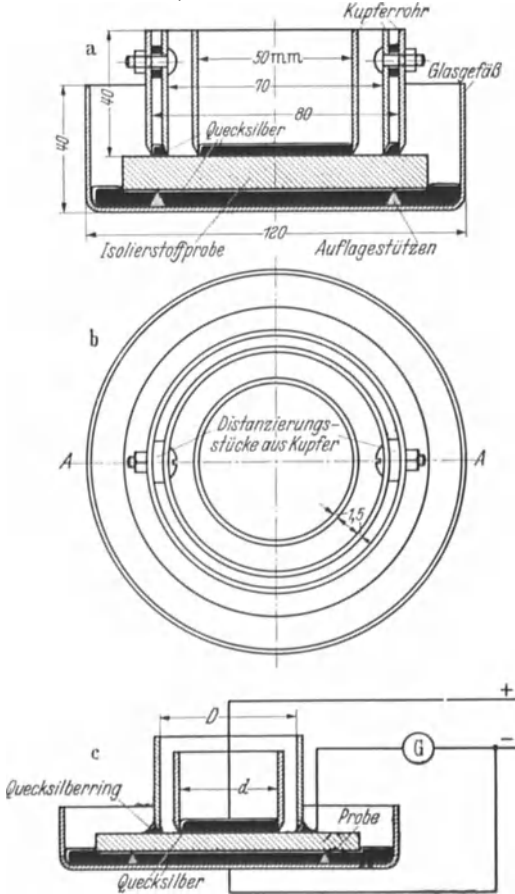


Abb. 30. Schutzringkondensator mit Quecksilberelektroden.

#### d) Elektrodenarten.

Je nach der Eigenschaft, die an dem Isolierstoff ermittelt werden soll, wird man eine zweckentsprechende Elektrodenform wählen.

α) Elektroden für die Bestimmung des dielektrischen Verlustfaktors, der Dielektrizitätskonstanten und des spezifischen Isolationswiderstandes.

Um bei elektrischen Untersuchungen Kriechströme über die Oberfläche der Isolierstoffe von der Messung auszuschließen oder bei der Bestimmung der Dielektrizitätskonstanten eine definierte Kapazität des Prüflings durch einen Ausschnitt aus einem homogenen elektrischen Feld zu erhalten, werden die Elektroden als Schutzringelektroden ausgebildet. Nach dem Prinzip des THOMSONSchen Kondensators (Abb. 28) besteht die Anordnung aus einer Spannungselektrode auf einer Seite des Isolierstoffes und einer Meßbelegung auf der anderen Seite. Die Meßbelegung, Radius  $r$ , ist von dem Schutzring umgeben, der Schutzring, innerer Radius  $r'$ , ist durch einen Schutzspalt,

Breite ( $r'-r$ ) von der Meßbelegung getrennt. Die gleiche Anordnung auf einen zylinderförmigen Prüfkörper übertragen ergibt den Zylinderschutzringkondensator (Abb. 29). Eine Schutzringanordnung kann nach Abb. 30 auch mit Hilfe von Quecksilberelektroden hergestellt werden<sup>1</sup>. Die Verwendung von offenem Quecksilber im Laboratorium ist jedoch unbequem.

Der Schutzring, der während der Messung ungefähr dasselbe Potential wie die Meßbelegung zeigt, soll doppelt so breit wie die Dicke der Platte, jedoch nicht unter 5 mm sein.

Der Schutzspalt soll für die Bestimmung des spezifischen Widerstandes und der Dielektrizitätskonstanten etwa 1 mm breit, für die Errechnung des reinen Oberflächenwiderstandes aus der Messung des spezifischen Widerstandes und des Isolationswiderstandes mindestens 5 mm breit sein.

Der Durchmesser der Meßbelegung soll etwa 70 mm betragen.

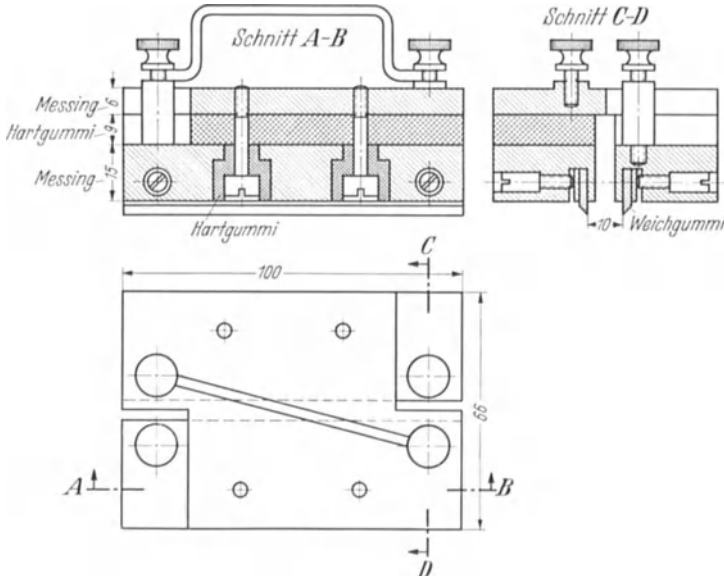


Abb. 31. Schneidenelektroden.

β) Elektroden für die Bestimmung des Oberflächenwiderstandes.

**1. Schneidenapparat.** Zwei parallele, gerade, 10 cm lange mit Gummi und Blattzinn gepolsterte Elektroden werden in 1 cm Abstand auf den Isolierstoff aufgesetzt (Normalapparat nach der VDE-Vorschrift, Abb. 31).

<sup>1</sup> JONES, T. I.: Quecksilberelektroden bei Hochfrequenz. J. Instn. electr. Engrs. Bd. 74 (1934) S. 179.

**2. Graphitelektroden.** Für die Messung werden mit einem weichen Bleistift zwei Striche von etwa 1,5 mm Breite und 25 mm Länge im Abstand von 2 mm voneinander auf die Isolierstoffoberfläche aufgemalt. Für die Striche sind Stifte mit besonderem weichen Material zu verwenden. In Fällen, in denen Graphit auf dem Isolierstoff nicht haftet, ist die Meßstelle mit feinstem Polierpapier bzw. mit Pariserrot ein wenig anzu-



Abb. 32. Spannungszuführung an aufgeriebene Graphitelektroden.

reiben. Ein Abschleifen der Oberfläche soll nicht stattfinden. Für die Zuführung der Spannungen an die Graphitelektroden dient nach dem Vorschlag der PTR (R. VIEWEG) ein Gerät nach Abb. 32<sup>1</sup>.

γ) Elektroden für die Messung von Isolationswiderständen.

**1. Konische Meßbrückenstöpsel.** (Den Verhältnissen der Praxis nachgeahmt.) Für die Messung an Platten und Rohren werden zwei konische Meßbrückenstöpsel von 5 mm Dmr. nach DIN 1 benutzt. Diese werden in Bohrungen mit einem Mittenabstand von 15 mm stramm pas-

send eingesetzt. Die Bohrungen sind mit einer Kegelreibahle 5 nach DIN 9 aufzureiben. Diese Elektroden werden insbesondere für die Längsprüfung von Isolierstoffen mit Schichtstruktur wie z. B. Hartpapierplatten und -rohren angewandt.

Außer dieser für die gleichzeitige Messung des Widerstandes im Innern und des Oberflächenwiderstandes benutzten Elektrodenart kommen für die Ermittlung des Isolationswiderstandes noch folgende in Betracht:

**2. Quecksilberelektroden** (vorzugsweise für Gesteine). Zwei Löcher von 5 mm Dmr. und 15 mm Mittenabstand werden in den Isolierstoff auf etwa  $\frac{2}{3}$  der Dicke, höchstens aber 10 mm Tiefe gebohrt und mit Quecksilber gefüllt. An Gesteinen, in denen der Isolationswiderstand an verschiedenen Meßstellen oft verschieden ist, werden nach Art eines Sechseckes mit Mittelpunkt 7 Löcher gebohrt und der Isolationswiderstand ausgehend von der Mitte nach 6 Richtungen ermittelt.

**3. Elektroden für Formkörper.** In Rohre oder Schläuche mit kleinem Durchmesser werden als innere Elektroden gut passende Metalldorne eingeführt. Auch das Ausfüllen mit Wasser oder Quecksilber wird mit Erfolg angewandt. Für die Aufbringung der äußeren Elektroden dienen die auf S. 61 beschriebenen Verfahren. Für Isolierschläuche wird nach der Prüfvorschrift der Deutschen Reichspost aus weichem Kupferdraht von 0,3 mm Dmr. ein Wickel von 3 Windungen herumgelegt. Unter

<sup>1</sup> PFESTORF, G.: Plast. Massen Bd. 5 (1935) S. 234.

Umständen wird auch als äußere Elektrode Quecksilber oder Wasser benutzt. Die Schläuche, Rohre oder Drähte werden in diesem Falle durch ein mit Quecksilber gefülltes U-Rohr hindurchgezogen.

Bei der Verwendung von Wasser oder wäßrigen Lösungen als Elektroden ist zu beachten, daß die Einbringung in die Flüssigkeit meist eine zusätzliche Beanspruchung des Isolierstoffes bedeutet.

Blattzinn als Elektrode ist in den Fällen zu verwenden, wo die Gewähr gegeben ist, daß es fest und glatt an der Oberfläche des Prüfkörpers anliegt.

δ) Elektroden für die Messung der Durchschlagsspannung  
oder für Spannungsprüfungen.

Aufsetzbare massive Elektroden.

**1. Plattenelektroden.** Als Plattenelektroden sind zwei ebene, runde Metallplatten von 25 oder 50 mm Durchmesser mit abgerundeten Kanten zu verwenden. Für die Kantenabrundung soll der Halbmesser 2,5 mm betragen, der Anpressungsdruck soll etwa  $100 \text{ g/cm}^2$  sein. Die eine Elektrode kann als Gewicht ausgebildet werden. Nach einem Durchschlag entsteht auf den Elektroden eine Brandspur, die einen Grat aufweist und ein Polieren der Elektroden nötig macht. Man kann dies vermeiden, wenn man um die Metallelektroden eine Blattzinnfolie von Hand auflegt und diese nach jedem Durchschlag erneuert. Diese Polsterung der Elektroden bewirkt außerdem einen innigen Kontakt mit dem Isolierstoff, da das Blattzinn unter dem Einfluß der Spannung fest am Isolierstoff haftet. Über Plattenelektroden mit besonderer Abrundung, deren Form rechnerisch so ermittelt wurde, daß auch am Rande ein praktisch homogenes Feld herrscht, siehe ROGOWSKI<sup>1</sup>.

**2. Kugelelektroden.** Als Kugelelektroden sind zwei gleiche Kugeln gebräuchlich, Durchmesser 10, 20 oder 50 mm. Die 10-mm-Kugeln kommen insbesondere in Frage für Durchschlagmessungen an Körpern kleiner Ausdehnungen, die 20-mm-Elektroden insbesondere für Einarbeitung in harte Platten, z. B. keramische Werkstoffe, die 50-mm-Kugeln für Einarbeitung in weiche Platten, z. B. Weichgummi. Bei aufgesetzten Kugeln ist ein Anpressungsdruck von 100 oder 200 g üblich.

**3. Kugel-Platte.** Die Kugel soll einen Durchmesser von 20 mm besitzen, die Platte eine runde, ebene Scheibe von 50 mm Dmr. mit abgerundeten Kanten sein. Der Halbmesser der Abrundung soll 2,5 mm betragen.

**4. Zwei gleiche Walzen.** Diese Elektroden sind insbesondere bei fortlaufenden Spannungsprüfungen während der Herstellung gebräuchlich. Der Durchmesser der Walzen soll 25 oder 50 mm betragen, der Halbmesser der Kantenabrundung 2,5 mm. Die Anpressung erfolgt durch das Eigengewicht der Walze.

<sup>1</sup> ROGOWSKI, W.: Arch. Elektrotechn. Bd. 12 (1923) S. 1; RENGIER, H. u. W. ROGOWSKI: Arch. Elektrotechn. Bd. 16 (1926) S. 73; ferner W. SCHILLING: Arch. Elektrotechn. Bd. 24 (1930) S. 383; C. STÖERK: ETZ Bd. 52 (1931) S. 43.

### e) Elektrische Eigenschaften.

#### α) Isolationswiderstand, Oberflächenwiderstand, spezifischer Oberflächenwiderstand.

*Isolationswiderstand bei Gleichspannung.* Wir betrachten eine Isolierstoffplatte zwischen zwei aufgepreßten Metallelektroden. Im spannungsfreien Zustand — die beiden Elektroden sind durch eine Leitung miteinander verbunden — liegen die Moleküle mit ihren positiven und negativen Ladungen infolge der Temperaturbewegung regellos durcheinander, so daß eine elektrische Wirkung nach außen nicht in Erscheinung tritt. Legen wir an die Elektroden der Anordnung eine Gleichspannung an, so findet in der Isolierstoffplatte eine Trennung der gebundenen positiven und negativen Ladungsträger statt. Die Trennung der Ladungsträger bedingt eine Bewegung elektrischer Ladungen, indem die Ladungen der Moleküle etwas auseinander rücken. Diese Elektrizitätsverschiebung entspricht wie jede Ladungsbewegung einem elektrischen Strom, dem dielektrischen Polarisationsstrom, der nach erfolgter Trennung der Ladungen abgeklungen ist. Der Isolierstoff ist polarisiert. Da jedoch in jedem Isolierstoff außer diesen gebundenen Ladungsträgern auch noch freie Ladungsträger vorhanden sind, es also einen absolut nichtleitenden Stoff nicht gibt, wird außer dem Polarisationsstrom der sog. Isolationsstrom weiter durch das Dielektrikum fließen. Dieser Isolationsstrom ist abhängig von der Höhe der an den Elektroden liegenden Spannung. Das Verhältnis der Spannung zu dem Isolationsstrom wird Isolationswiderstand genannt, und zwar ohne Rücksicht auf die zuweilen unterschiedlichen Isolationswiderstände der Oberflächenschicht und des Isolierstoffinneren. Die Einheit des Widerstandes ist das Ohm ( $\Omega$ ). Die Isolationswiderstände werden meist in Millionen Ohm, Megohm ( $M\Omega$ ), angegeben.

Der reziproke Widerstandswert heißt Leitfähigkeit. Die Einheit der Leitfähigkeit ist das Siemens (S).

Die Höhe des Isolationsstromes, der nur auf der Oberfläche des Isolierstoffes fließt, ist durch den *Oberflächenwiderstand* gegeben. Praktisch ist es nicht möglich, den Oberflächenwiderstand allein direkt zu messen, da stets elektrische Kraftlinien im Inneren des Isolierstoffes verlaufen und somit das Isolierstoffinnere einen Anteil an der gemessenen Leitfähigkeit besitzt<sup>1</sup>. Der reine Oberflächenwiderstand  $R_0$  eines Isolierstoffes kann errechnet werden, wenn der Widerstand  $R_i$  im Inneren einmal mit Schutzring unter Ausschluß der Oberflächenleitfähigkeit (Durchgangswiderstand) und der Isolationswiderstand  $R_s$  zwischen der geschützten Elektrode und der Spannungsbelegung gemessen wird, wobei

<sup>1</sup> Theoretisch und experimentell wurde der Anteil des Isolierstoffinneren an der Stromleitung von L. HARTSHORN [Proc. phys. Soc., Lond. Bd. 42 (1930) S. 300] untersucht.

die Spannungselektrode mit dem Schutzring verbunden ist (Abb. 33 und 34). Die Breite des Schutzspaltes soll mindestens 5 mm betragen. Aus der Parallelschaltung des Widerstandes im Inneren  $R_i$  und des Oberflächenwiderstandes  $R_0$  folgt aus den gemessenen Werten der Oberflächenwiderstand

$$R_0 = \frac{R_i \cdot R_g}{R_i - R_g}.$$

Wenn der Widerstand im Inneren  $R_i$  nicht mindestens 10% größer ist als der Isolationswiderstand  $R_g$ , ist der Oberflächenwiderstand gegen den Widerstand im Inneren zu vernachlässigen, d. h. die ganze Elektrizitätsleitung erfolgt durch das Isolierstoffinnere, und es ist keine leitende Oberflächenschicht, z. B. adsorbierte Wasserhaut, auf dem Isolierstoff vorhanden, deren Leitfähigkeit neben der Leitfähigkeit des Isolierstoffinneren von Bedeutung ist.

Aus den Abmessungen der Elektroden und dem reinen Oberflächenwiderstand  $R_0$  kann der *spezifische Oberflächenwiderstand* ermittelt werden. Der spezifische Oberflächenwiderstand ist definiert als das Vierfache des Widerstandes zwischen zwei parallelen, mit Elektroden versehenen Seiten eines Würfels von 1 cm Kantenlänge, dessen Isolationsstrom nur durch die Oberflächenschicht fließt.

Es ist im Falle paralleler Elektroden der spezifische Oberflächenwiderstand

$$\varrho_0 = \frac{R_0 \cdot l}{a},$$

wobei  $l$  die Länge der Elektroden und  $a$  den Abstand der Elektroden in gleichen Maßeinheiten bedeuten. Bei parallelen Schneidenelektroden soll die Länge mindestens das Zehnfache des Abstandes betragen, damit die Randwirkung der Elektroden zu vernachlässigen ist.

Im Falle konzentrischer Ring- bzw. Kreiselektroden mit 5 mm breitem Schutzspalt ergibt sich für den spezifischen Oberflächenwiderstand

$$\varrho_0 = \frac{R_0 \cdot 2\pi}{\log \text{nat} \frac{D}{d}},$$

wobei  $D$  dem inneren Durchmesser des äußeren Elektrodenringes und  $d$  dem Durchmesser der inneren kreisförmigen Elektrodenbelegung gleich ist.

Aus der Messung des Oberflächenwiderstandes zwischen aufgesetzten oder gepreßten Elektroden wird mitunter unter Vernachlässigung des

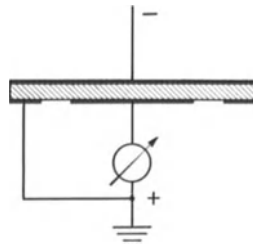


Abb. 33. Schaltung zur Messung des Durchgangswiderstandes.

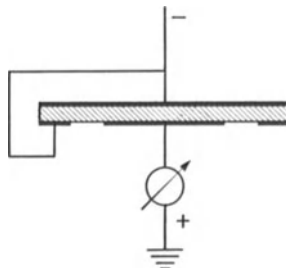


Abb. 34. Schaltung zur Messung des Isolationswiderstandes zwischen der Meßbelegung und der mit dem Schutzring verbundenen Spannungselektrode.

Anteiles des Isolierstoffinneren an der Stromleitung aus den Abmessungen der Elektroden ebenfalls ein spezifischer Oberflächenwiderstand  $\varrho_0$  errechnet. So gilt z. B. für eine in Amerika gebräuchliche Elektrodenanordnung nach Abb. 38 S. 75 für den spezifischen Oberflächenwiderstand

$$\varrho_0 = \frac{\pi \cdot R'_0}{\log \text{nat} \left[ \frac{d}{2r} + \sqrt{\left(\frac{d}{2r}\right)^2 - 1} \right]},$$

wobei  $d$  den Abstand zwischen den Scheibenmitten,  $r$  den Radius der Scheiben und  $R'_0$  den Isolationswiderstand zwischen den Scheiben bedeuten. Wenn  $d$  Werte zwischen  $3r$  und  $4r$  besitzt, ist folgende angenäherte Formel zulässig:

$$\varrho_0 = \frac{\pi}{2} R'_0 \frac{d+r}{d-r}.$$

Bei den meisten Isolierstoffen ist auch nach dem angegebenen Verfahren der Anteil des Isolierstoffinneren an der Stromleitung von der

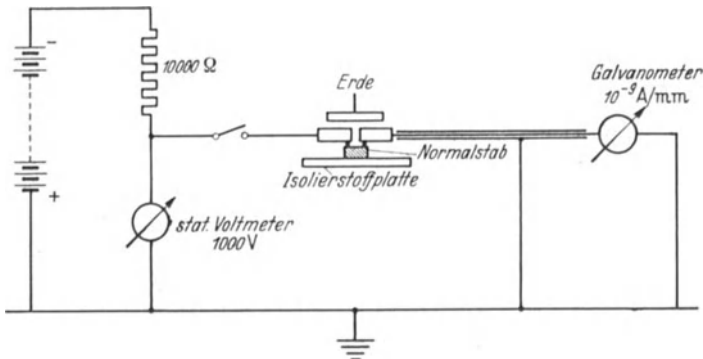


Abb. 35. Schaltung für die Messung des Oberflächenwiderstandes.

Oberflächenleitfähigkeit nicht zu trennen. Deshalb wird in den Prüfverfahren des VDE auf diese Trennung im allgemeinen verzichtet und als Oberflächenwiderstand ein Isolationswiderstand zwischen Elektroden angegeben, bei dem Kraftlinien auch in der Isolierstoffoberfläche verlaufen.

#### Prüfvorschriften

für die Messung des Oberflächenwiderstandes.

**Deutschland.** Der Oberflächenwiderstand wird mit dem Schneidapparat (S. 67) bei  $1000 \text{ V}$  Gleichspannung  $1 \text{ min}$  nach Anlegen der Spannung ermittelt. Der Anteil des Isolierstoffinneren an der Stromleitung wird nicht berücksichtigt. Das Schaltschema zeigt Abb. 35. Die eine Elektrode wird über einen Schutzwiderstand von  $10000 \Omega$  mit dem negativen Pol der Gleichspannung von  $1000 \text{ V}$  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  $1 \cdot 10^{-9}$  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 Galvanometers wird beim Nebenschluß  $\frac{1}{100000}$  statt des Oberflächenapparates ein Drahtwiderstand von 1 M $\Omega$  eingeschaltet (dieser wird aus 0,05 mm dickem Manganindraht unifilar aufgewickelt). Der Schutzwiderstand besteht aus 0,1 mm dickem Manganindraht, der unifilar auf ein Porzellan- oder Glasrohr von etwa 6 cm Dmr. und 50 cm Länge aufgewickelt ist; der Schutzwiderstand ist auf 3% genau abzugleichen. Ein statischer Spannungsmesser mißt die Spannung hinter dem Schutzwiderstand.

**Ausführung 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  $\Omega$ . Bleibt die Spannung über 800 V, so kann mit dem Galvanometer gemessen werden. Die Ablesung des Galvanometerauschlag erfolgt 1 min nach dem Anlegen der Spannung.

Aus dem gemessenen Strom und der Spannung wird der Widerstand in M $\Omega$  ermittelt. Die Werte für den Widerstand auch an dem gleichen Isolierstoff sind mit erheblichen Streuungen behaftet. Als Oberflächenwiderstand sind nur die „Vergleichszahlen“ anzugeben. Die Vergleichszahlen, die den Zehnerpotenzen des Widerstandes entsprechen, sind in Tabelle 7 aufgeführt.

Für eine Versuchsreihe sind 5 Messungen an verschiedenen Proben vorzunehmen. Ergeben an einer Sorte Isolierstoff 3 Messungen die Vergleichszahl 9, 2 Messungen die Vergleichszahl 8, so ist für das Ergebnis

Tabelle 7.

Isolationswiderstand zwischen aufgesetzten Schneiden von 10 cm Länge in 1 cm Abstand M $\Omega$	Oberflächenwiderstand	
	Vergleichs- zahl	alte Ver- gleichszahl des VDE
Über 1 Million . . .	12	5
1 Million bis 100000	11	4a
100000 bis 10000	10	4b
10000 bis 1000	9	3a
1000 bis 100	8	3b
100 bis 10	7	2a
10 bis 1	6	2b

der Messungen 9 — 8 anzugeben. Haben je 2 Messungen das Ergebnis 9 und 8 und hat eine Messung das Ergebnis 10, so ist zuerst die niedere Vergleichszahl zu nennen, so daß sich für den Oberflächenwiderstand 8 — 9 — 10 ergibt.

Die Messungen werden vorwiegend an „Normalstäben“ aus Isolierpreßstoff mit den Abmessungen  $10 \times 15 \times 120$  mm vorgenommen. Es sind jedoch auch beliebige Prüfkörper verwendbar. Wenn sich der Schneidenapparat nicht aufsetzen läßt, werden Graphitelektroden nach S. 68 angebracht.

Der Prüfling soll bei der Messung nicht auf eine geerdete Metallfläche gelegt werden, da hierdurch die elektrische Feldverteilung eine andere wird und der gemessene Widerstandswert zu hoch ausfallen kann. Der Oberflächenwiderstand guter Isolierstoffe soll die Vergleichszahl 8 *nicht* unterschreiten.

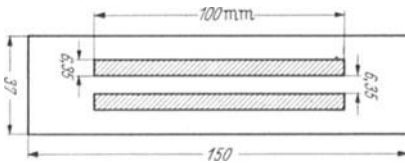


Abb. 36. Elektroden für die Messung des Oberflächenwiderstandes nach den englischen Prüfvorschriften. Ober- und Unterseite des Prüfstabes tragen zwei aufgetriebene Graphitelektroden.

Bei der Messung des Oberflächenwiderstandes wird gleichzeitig auch der Widerstand des Inneren mit erfaßt. Es läßt sich daher aus dem mit dem Ober-

flächengerät ermittelten Widerstandswert durch Multiplikation mit 10 nur ein angenähert richtiger spezifischer Oberflächenwiderstand angeben.

**England<sup>1</sup>.** Der Oberflächenwiderstand von *Hartpapierplatten* wird zwischen 4 Graphitelektroden in einer Anordnung gemäß Abb. 36 gemessen. Die etwa 6,4 mm breiten und 100 mm langen Streifen sind mit einer kolloidalen Graphitlösung vor der Vorbehandlung aufgemalt. Der Prüfling, eine Art Normalstab, besitzt die Dicke der Platte. Für die Messung werden die einander gegenüberliegenden Elektrodenstreifen miteinander verbunden. Die Meßspannung ist 500 V Gleichspannung.

An Platten aus *Isolierpreßstoff* erfolgt die Messung zwischen Quecksilberschutzringeletroden oder Graphitelektroden, die nach Art der Quecksilberschutzringeletroden aufgestrichen sind. Größe und Abmessungen sowie die Schaltanordnung sind aus der Abb. 30 zu ersehen. Der Leitfähigkeitsanteil des Isolierstoffinneren wird nicht berücksichtigt. Die Meßspannung ist 500 V Gleichspannung. Aus den gemessenen Werten und der Elektrodenanordnung wird ein angenäherter spezifischer Oberflächenwiderstand errechnet. Es ist

$$\varrho_0 = \frac{2\pi R}{\log \text{nat} \frac{r_2}{r_1}},$$

$R$  Oberflächenwiderstand in  $\Omega$ ,  $r_2$  innerer Radius des Schutzringes,  $r_1$  Radius der Meßbelegung.

<sup>1</sup> Anweisungen für die Durchführungen aller Prüfungen an Isolierstoffen in England s. J. Amer. Instn. electr. Engrs. Bd. 81 (1937) S. 553.

Vorbehandlung. 1. *Hartpapier*. Die Messungen werden nach 24stündigem Liegen der Proben in einem Raum mit mindestens 90% relativer Luftfeuchtigkeit bei 50° C ausgeführt. Während der Messung sollen die Proben möglichst nicht aus dem Klimaschrank entfernt werden.

2. *Preßstoffe*. a) Das Prüfstück wird mit Äther (spez. Gew. 0,68 bei 15° C) abgewaschen, darauf 18 h lang einer relativen Luftfeuchtigkeit von 75% bei einer Temperatur zwischen 15 und 25° C ausgesetzt. Geforderter Mindestwert:  $10^5 \text{ M}\Omega$  spezifischer Oberflächenwiderstand.

b) Die Prüflinge haben 24 h in destilliertem Wasser von Raumtemperatur gelegen und werden nach dem Herausnehmen mit einem Tuch abgetrocknet. Geforderter Mindestwert:  $10^4 \text{ M}\Omega$  spezifischer Oberflächenwiderstand.

**Amerika.** Im allgemeinen wird der Oberflächenwiderstand aus einer mit Schutzring versehenen Anordnung, Breite des Schutzspaltes mindestens 5 mm, aus den Messungen des Widerstandes im Inneren und des Isolationswiderstandes nach S. 71 errechnet und aus den Abmessungen der Elektroden der spezifische Widerstand angegeben.

Im vereinfachten Verfahren werden unter der Voraussetzung, daß der Widerstand im Inneren gegen den Oberflächenwiderstand hoch ist, als Elektroden Metallstreifen nach Abb. 37 auf Ober- und Unterseite der Prüfplatte aufgeschraubt. Die Elektroden bestehen aus Blatzinn, das um die steifen Metallstreifen herumgelegt ist und eine gewisse Polsterung sowie einen innigen Kontakt zwischen Elektrode und Isolierstoff bewirkt.

Um die Prüfelektroden den Verhältnissen der Praxis anzupassen, verzichtet man auf eine strenge Trennung zwischen Oberflächenwiderstand und Widerstand im Inneren und verwendet als Elektroden auch eingepaßte Schloßschrauben mit Muttern und Unterlagscheiben gemäß Abb. 38.

Die Spannung wird an die beiden äußeren Elektroden angelegt, während die mittlere Elektrode mit dem Galvanometer verbunden ist. Aus der Messung wird nach Formel S. 72 ein angenäherter spezifischer Oberflächenwiderstand errechnet. Die Verfahren und Einrichtungen für

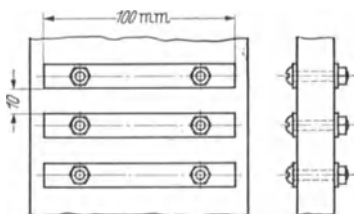


Abb. 37. Streifenelektroden für die Messung des Oberflächenwiderstandes nach den amerikanischen Prüfvorschriften.

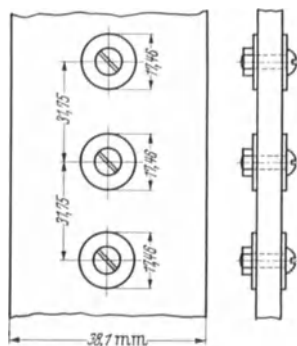


Abb. 38. Scheibenelektroden für die Messung des Oberflächenwiderstandes nach den amerikanischen Prüfvorschriften.

die Messungen sind die gleichen, die für die Messung des Widerstandes im Inneren benötigt werden. Sie sind deshalb auf S. 78 beschrieben.

Meßspannung und Zeit der Ablesung der Galvanometerausschläge nach Anlegen der Spannung sind nicht vorgeschrieben. Der Isolationswiderstand ist jedoch meist von der Höhe der Meßspannung abhängig. Die Ablesung des Galvanometerauschlages kann im allgemeinen erst

erfolgen, nachdem der exponentielle Rückgang nach dem Anlegen der Spannung abgeklungen ist.

**Vorbehandlung.** Die Messungen des Oberflächenwiderstandes sollen an Proben ausgeführt werden, die vorher 48 h in Luft bestimmter relativer Luftfeuchtigkeit gelagert worden sind. Messungen des Isolationswiderstandes an porösen oder hygroskopischen Werkstoffen sollen nach 4tägiger Lagerung der Proben in einem Raum bestimmter Luftfeuchtigkeit vorgenommen werden. Für die Messung sollen die Proben nicht aus dem Feuchtigkeitsschrank entfernt werden.

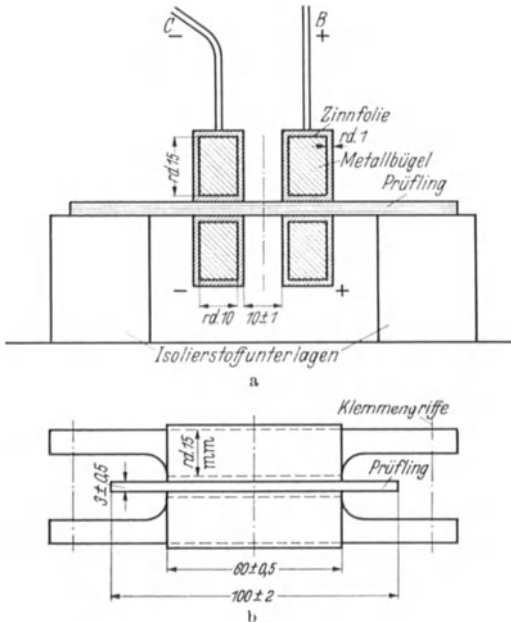


Abb. 39a und b. Anordnung der Elektroden für die Messung des Oberflächenwiderstandes nach den französischen Prüfvorschriften.

**Frankreich.** Nach den französischen Leitsätzen wird der Oberflächenwiderstand zwischen zwei gleichen Elektrodenpaaren gemessen, die einander gegenüber auf der Ober- und Unterseite einer rechteckigen Prüfplatte von 100 mm Kantenlänge und 3 mm Dicke angebracht sind. Die Elektroden sind mit Ansätzen versehen, die gestatten, die einander gegenüberliegenden Elektroden mit Metallklammern zu verbinden, ohne daß die Isolierstoffplatte berührt wird. Die Elektroden sind 60 mm lang und im Abstand von 10 mm auf den Prüfling aufgespannt. Die Anordnung geht aus den Abb. 39a und b hervor. Aus dem gemessenen Widerstand  $R$  wird ein spezifischer Oberflächenwiderstand

$$\rho_0 = \frac{R \cdot 2l}{d}$$

( $l$  Länge der Elektroden,  $d$  Abstand der Elektroden) errechnet.

Die Meßspannung soll zwischen 250 und 350 V liegen und die Messung nach 24stündigem Liegen der Prüfkörper in einem Raum konstanter Luftfeuchtigkeit zwischen 60 und 80% vorgenommen werden.

**Schweiz.** In den Vorschriften dieses Landes ist die Bestimmung des Oberflächenwiderstandes an Isolierpreßstoffen nicht vorgesehen.

### β) Durchgangswiderstand.

Der Durchgangswiderstand  $R_i$ , auch mit Widerstand im Inneren bezeichnet, ist der Widerstand des Isolierstoffes in einem homogenen elektrischen Feld unter Ausschluß der Oberflächenleitfähigkeit. Er ergibt sich als Verhältnis der Spannung zu dem *durch* den Isolierstoff fließenden Strom und wird in einer Elektrodenanordnung mit Schutzring nach Abb. 33 S. 71 gemessen. Der Schutzspalt soll jedoch nur etwa 1 mm breit sein. Der Schutzring oder die Schutzbelegung, die während der Messung geerdet wird, ist etwa doppelt so breit wie die Dicke der Platte, mindestens 5 mm.

Unter der Voraussetzung einer homogenen Feldverteilung kann aus den Abmessungen des Prüfkörpers der spezifische Widerstand  $\varrho$ , d. h. der Widerstand eines Würfels von 1 cm Kantenlänge errechnet werden.

$\varrho$  hat die Dimension  $\Omega$  cm, der reziproke Wert  $1/\varrho$  heißt spezifische Leitfähigkeit  $\kappa$ , er hat die Dimension  $\Omega^{-1} \text{ cm}^{-1}$  oder  $\text{S cm}^{-1}$ .

Für einen Plattenkondensator ist

$$\varrho = \frac{R_i \cdot F}{a},$$

wobei  $R_i$  den gemessenen Widerstand,  $F$  die Meßfläche in  $\text{cm}^2$  und  $a$  den Abstand der Elektroden in cm bedeuten. Für rohrförmige Prüfkörper mit radialem Feldverlauf ist der spezifische Widerstand

$$\varrho = \frac{R_i \cdot 2\pi l}{\log \text{nat} \frac{r_2}{r_1}},$$

wobei  $l$  die Länge der Meßbelegung in cm und  $r_1$  und  $r_2$  die Radien des äußeren und inneren Zylinders in einer beliebigen Maßeinheit bedeuten. Der Durchmesser der geschirmten Meßbelegung einer Platte bzw. die Länge der Meßbelegung eines Rohres wird von Mitte bis Mitte des unbelegten Schutzstreifens gerechnet.

Der reziproke Wert des Faktors, mit dem der Widerstand im Inneren multipliziert den spezifischen Widerstand ergibt, heißt die Widerstandskapazität  $Z$  der Anordnung. Sie ist mithin für den Plattenkondensator  $Z = a/F$ , für den rohrförmigen Prüfkörper

$$Z = \frac{1}{2\pi l} \log \text{nat} \frac{r_2}{r_1} \quad r_2 > r_1,$$

für einen Konus von der Länge  $l$  und den nahezu gleichen, gegen  $l$  kleinen Endhalbmessern  $r_1$  und  $r_2$

$$Z = \frac{l}{r_1 r_2 \pi},$$

für eine Hohlkugel

$$Z = \frac{1}{4\pi} \left( \frac{r_2 - r_1}{r_1 r_2} \right).$$

Meßverfahren. 1. *Ermittlung des Widerstandes im Inneren aus Strom- und Spannungsmessung.* Der negative Pol der Gleichspannungsquelle wird über einen Schutzwiderstand von  $10000 \Omega$  mit der ungeschützten Elektrode, die geschützte Elektrode mit einem empfindlichen Galvanometer und der Schutzring mit Erde verbunden. Der Pluspol der Gleichspannungsquelle sowie die zweite Galvanometerklemme sind gleichfalls geerdet. Die Verbindung der geschützten Elektrode zum Galvanometer erfolgt über eine hochisolierte, mit einer metallischen geerdeten Abschirmung versehenen Leitung. Die Abschirmung dient dazu, Isolationskriechströme, die von der Gleichspannungsquelle auf die Galvanometerleitung gelangen

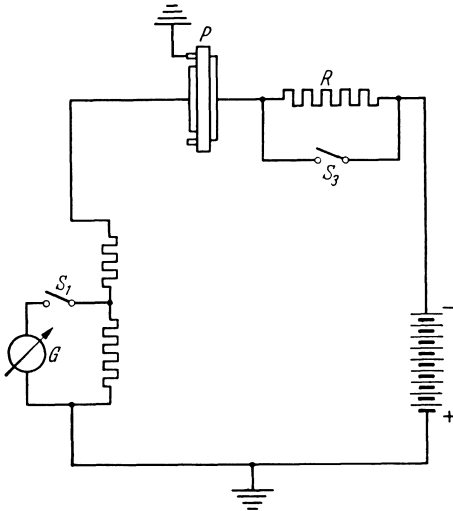


Abb. 40. Isolationsmessung mit Vergleichswiderstand.

können, von der Messung auszuschließen. Die Schaltanordnung ist in Abb. 33 gezeichnet. Aus dem gemessenen Strom und der gemessenen Spannung ergibt sich der Widerstand  $R = U/I$ . Bei  $1000 \text{ V}$  Gleichspannung und einer Galvanometerempfindlichkeit von  $1 \cdot 10^{-9} \text{ A/mm}$  können in dieser Anordnung Widerstände von  $10^{12} \Omega$  gemessen werden. Ist der Strom durch den Isolierstoff kleiner als  $1 \cdot 10^{-9} \text{ A/mm}$ , so kann durch Vergrößerung der Elektrodenflächen oder Erhöhung der Meßspannung der Strom durch den Isolierstoff vergrößert und damit meßbar gemacht werden. Auch durch Verwendung eines empfindlicheren Galvanometers kann der Meßbereich nach hohen Isolationswiderständen hin erweitert werden.

2. *Widerstandsmessung durch Vergleich mit einem bekannten Widerstand.* Steht ein bekannter Vergleichswiderstand zur Verfügung, so kann der Widerstand im Inneren nach der Anordnung Abb. 40 wie folgt gemessen werden. Bei geschlossenem Schalter  $S_3$  wird der Ausschlag des Galvanometers  $\alpha_1$  und sein Nebenschlußfaktor  $s_1$  notiert, sodann wird

der Prüfling  $P$  kurzgeschlossen und der Schalter  $S_3$  geöffnet. Es ergibt sich für den Vergleichswiderstand  $R$  ein Galvanometerausschlag  $\alpha_2$  bei einem Nebenschlußfaktor  $s_2$ . Ist  $R$  der Wert des bekannten Widerstandes in  $\Omega$ , so ergibt sich der Widerstand im Inneren des Prüflings zu

$$R_i = R \frac{\alpha_2 s_2}{\alpha_1 s_1}. \quad (1)$$

Wird bei der ersten Messung  $S_3$  nicht geschlossen, so ergibt sich

$$R_i = R \frac{\alpha_2 s_2}{\alpha_1 s_1} - R. \quad (2)$$

Der Vergleichswiderstand soll einen Wert von mindestens 100000  $\Omega$  aufweisen. Da alle Fehler des Widerstandes  $R$  proportional in das Meßergebnis für den Isolationswiderstand eingehen, soll der Vergleichswiderstand aus Manganindraht sein.

Oft wird bei der gewählten Meßspannung der Ausschlag des Galvanometers bei kurzgeschlossenem Prüfling größer sein als der Meßbereich des Galvanometers. In diesem Falle kann die Spannung bei der Messung des Vergleichswiderstandes auf einen Wert  $u$  herabgesetzt werden. Beide Spannungswerte sind mit Voltmetern zu messen. Für den Widerstand im Inneren ergibt sich dann

$$R_i = R \frac{\alpha_2 s_2}{\alpha_1 s_1} \cdot \frac{u}{U} \quad (3)$$

und für die Formel (2)

$$R_i = R \frac{\alpha_2 s_2}{\alpha_1 s_1} \cdot \frac{u}{U} - R. \quad (4)$$

*3. Ballistische Verfahren für die Messung des Widerstandes im Inneren*<sup>1</sup>. An Stelle der Verfahren nach 1 und 2 und in den Fällen, wo deren Empfindlichkeit nicht mehr ausreicht, kann eine ballistische Meßmethode angewandt werden, die mit einer kleinen Umschaltung die Messung des Isolationswiderstandes gestattet und daraus die Errechnung des reinen Oberflächenwiderstandes, s. S. 70, ermöglicht. Das Schaltschema dieser Anordnung, das einen Hilfskondensator  $C_H$  erfordert, ist in der Abb. 41 wiedergegeben. Um zunächst den Widerstand im Inneren zu bestimmen, wird der Schutzring durch den Schutzringschalter über  $C$  mit Erde verbunden. Der Umschalter wird nach  $A$  gelegt und durch den Schalter  $S_2$  das Galvanometer kurzgeschlossen. Letzteres ist nötig, damit der Ladestromstoß über den Prüfling nicht durch das Galvanometer fließt. Nun wird Schalter  $S_1$  geschlossen und 1 min nach Anlegen der Spannung wieder geöffnet; 3 min nach der Öffnung wird Schalter  $S_1$  wieder geschlossen. Die durch den Prüfling in diesen 3 min geflossenen Ladungen, die auf dem Hilfskondensator  $C_H$  gesammelt wurden, werden dabei bei offenem Schalter  $S_2$  über das Galvanometer zur Erde abgeführt. Der ballistische

<sup>1</sup> A.S.T.M. Standards on Electr. Ins. Materials 1937 S. 269.

Ausschlag des Galvanometers wird abgelesen. Nachdem der Prüfling 2 min lang kurzgeschlossen ist, soll die Messung nach Umpolung der Spannungsquelle wiederholt werden.

Für die Berechnung des Widerstandes aus dem ballistischen Galvanometerausschlag wird der Strom  $i$  während der Zeit, in der der Schalter  $S_1$

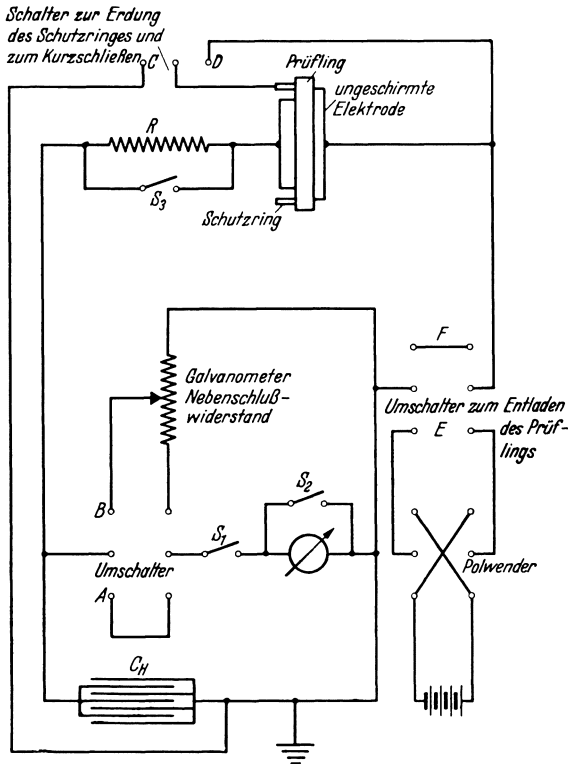


Abb. 41 Schaltung für die Messung des Isolations- und Oberflächenwiderstandes.

geöffnet ist, als nahezu konstant vorausgesetzt. In der Zeit  $t$  sammelt sich eine Ladungsmenge  $q = it$  auf dem Kondensator an. Diese elektrische Ladung gibt einen ballistischen Ausschlag  $\alpha$ . Wenn die Spannung  $U$  am Kondensator liegt, ergibt sich für den Widerstand

$$R = \frac{U}{i} = \frac{U \cdot t}{q} = \frac{U \cdot t}{\alpha \cdot K}$$

$K$  ist die ballistische Konstante des Galvanometers.

Wird nach einer Ladezeit von 3 min kein ballistischer Galvanometerausschlag beobachtet, ist der Widerstand zu hoch und kann nach diesem Verfahren nicht gemessen werden.



Um die ballistische Konstante des Galvanometers zu bestimmen, wird eine bekannte Elektrizitätsmenge durch das Galvanometer entladen; dazu wird ein Normalkondensator auf die Spannung  $U$  aufgeladen und diese Elektrizitätsmenge  $Q = U \cdot C$  durch das Galvanometer entladen; sie liefere einen Ausschlag  $\alpha_0$ . Die ballistische Konstante ergibt sich dann zu

$$K = \frac{Q}{\alpha_0} = \frac{C \cdot U}{\alpha_0}.$$

Die Verfahren der Messung nach 2 und 3 können in einer gemeinsamen Schaltungsanordnung mit Hilfe einiger Umschalter zusammengefaßt werden, wie dies in Abb. 41 gezeichnet ist. Die Kombination bietet den Vorteil, daß im Falle des Versagens der Galvanometermessung sofort die empfindlichere ballistische Methode angewandt werden kann.

Gleichzeitig kann durch Umlegen des Schutzringschalters nach  $D$  der Schutzring der Anordnung mit der Spannungselektrode verbunden und der Isolationswiderstand zwischen der Meßelektrode und den zwei anderen Elektrodenbelegungen gemessen werden, sofern der Schutzspalt für die Ermittlung des Oberflächenwiderstandes mindestens 5 mm breit ist. Aus diesem Isolationswiderstand und dem Widerstand im Inneren läßt sich nach S. 71 der reine Oberflächenwiderstand errechnen.

Der spezifische Widerstand ist von der Höhe der Meßspannung und von den äußeren Versuchsbedingungen wie Temperatur, relative Luftfeuchtigkeit und Vorbehandlung abhängig. Bei der Beurteilung von Meßergebnissen und beim Vergleich sind deshalb diese Faktoren zu berücksichtigen. Normale Versuchsbedingungen sind Raumtemperatur, etwa 20° C, relative Luftfeuchtigkeit 65%, Isolierstoff unvorbehandelt; über besondere Vorbehandlungen s. S. 161<sup>1</sup>.

*4. Messungen des Isolationswiderstandes unabgeschirmter Anordnungen.* Wenn der Isolierstoff an örtlich verschiedenen Stellen sehr unterschiedliche spezifische Widerstände aufweist, z. B. durch den Einschluß leitender Adern, verzichtet man auf die Bestimmung des spezifischen Widerstandes. Auch wenn sich abgeschirmte Elektroden nur schwer auf der Isolierstoffprobe anbringen lassen, z. B. bei engen Röhren, Formkörpern oder wenn bei der Prüfung nur die im praktischen Betrieb vorliegenden Verhältnisse nachgeahmt werden sollen, bestimmt man den Isolationswiderstand zwischen zwei beliebigen Elektroden schlechthin. Dadurch wird gleichzeitig die Oberflächenleitfähigkeit und die Leitfähigkeit im Inneren des Isolierstoffes erfaßt.

Schließlich wendet man die Ermittlung des Isolationswiderstandes noch an, wenn die Empfindlichkeit der unter 1 bis 3, S. 78, beschriebenen

<sup>1</sup> Prüfeinrichtungen liefern u. a. die Firmen Siemens & Halske, Hartmann & Braun. Die Firma H. Tinsley Ltd. London liefert abgeschirmte Meßplätze, die auch bei hoher Luftfeuchtigkeit richtige Isolationswerte ergeben. GALL, D. C.: J. sci. Instrum. Bd. 8 (1931) S. 389.

Schutzringverfahren nicht ausreichen, um einen spezifischen Widerstand zu messen. Dies kommt bei den hochisolierenden Werkstoffen wie Quarz, Bernstein u. a. in Betracht. Man muß dann elektrometrische Meßverfahren benutzen, die im allgemeinen die Anwendung von Schutzringen nicht gestatten. In diesem Falle ist jedoch sowohl der Widerstand im Inneren wie der Oberflächenwiderstand sehr hoch.

5. *Ermittlung des Isolationswiderstandes aus der Entladezeit eines Kondensators.* (Für die Messung sehr hoher Isolationswiderstände.) Eine Elektrode eines Hilfskondensators  $C$  bekannter Kapazität und des Prüflings  $P$  ist mit einem Elektrometer und über einen hochisolierenden Schalter mit einer Spannungsquelle verbunden, die andere ist geerdet (s. Abb. 42).

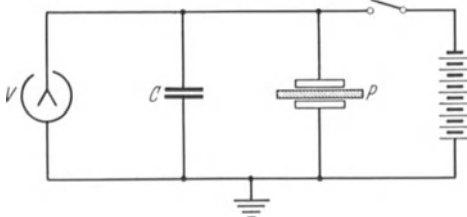


Abb. 42. Anordnung für die Messung des Isolationswiderstandes aus der Entladezeit eines Kondensators.

Die Anordnung wird auf die Spannung  $U_1$  aufgeladen und von der Spannungsquelle getrennt. Die am Elektrometer abgelesene Spannung wird dadurch in der Zeit  $t$  auf die Spannung  $U_2$  sinken. Ist  $C$  die Kapazität der Anordnung einschließlich des Elektrometers, so ergibt sich für

den Widerstand des Entladungsweges, der vorwiegend durch den Kondensator (die Ableitung durch das Elektrometer kann vernachlässigt werden) erfolgt,

$$R_0 = \frac{1}{C} \cdot \frac{t}{\log \text{nat} \frac{U_1}{U_2}}. \quad (1)$$

Die Ladung der Kapazität der Anordnung ist  $Q = C \cdot U$ , der Strom, der durch den Kondensator fließt  $I = dQ/dt$ , der Isolationswiderstand  $R = U/I$ ; das ergibt

$$\frac{U}{R} = C \cdot \frac{dU}{dt} \quad \text{oder} \quad \frac{dt}{RC} = \frac{dU}{U}. \quad (2)$$

Integration von (2) liefert obige Gleichung (1).

Ist  $R_0$  der Isolationswiderstand des Kondensators,  $R'$  der Isolationswiderstand des Kondensators mit parallelgeschaltetem Prüfling, so ergibt sich für den Isolationswiderstand des Prüflings allein

$$R = \frac{R_0 \cdot R'}{R_0 - R'}.$$

In Gleichung (1) S. 82 ist der Wert für  $C$  in F, die Zeit in s einzusetzen, um den Wert in  $\Omega$  zu erhalten. Das Maß für die Spannung ist, da es nur als Verhältnis eingeht, gleichgültig. Das Elektrometer braucht mithin nicht in V geeicht zu sein. Wird die Zeit in s abgelesen, in der

die Spannung  $V_1$  auf den  $e$ -ten Teil, d. h. auf  $V/2,718$  abgesunken ist, so wird

$$\frac{V_1}{V_2} = 2,718 \quad \text{und} \quad \log \text{nat} \frac{V_1}{V_2} = 1$$

und damit

$$R = \frac{t}{C} \cdot 1$$

1. *Elektrometrisches Verfahren mit Kompensation*<sup>2</sup>. Trägt man den Elektrometerausschlag nach dem im vorhergehenden Abschnitt beschriebenen Meßverfahren in Abhängigkeit von der Zeit graphisch auf, so erhält man keine genaue  $e$ -Funktion; das bedeutet, daß der Widerstandswert je nach den Zeitpunkten, die der Berechnung zugrunde gelegt werden, ein anderer ist. Die Gleichung (1) S. 82 ist unter der Voraussetzung der Gültigkeit des Ohmschen Gesetzes abgeleitet. Diese Voraussetzung für die Gültigkeit der Gleichung ist mithin nicht streng erfüllt.

Das Verfahren nach HIGGS<sup>3</sup> läßt deshalb mit konstanter Meßspannung über den hohen zu untersuchenden Widerstand ein Elektrometer auf. Parallel zum Elektrometer liegt ein Präzisionsdrehkondensator in Reihe mit einer Gleichstromspannungsquelle. Durch stetige Änderung der Kapazität des Drehkondensators kann die durch den hohen Widerstand erfolgende Aufladung des Elektrometers kompensiert werden, das Elektrometer bleibt in Ruhe. Aus der Meßspannung  $V_1$  und der gemessenen Kapazitätsänderung  $\Delta C$  in der Zeit  $t$  folgt der Widerstand

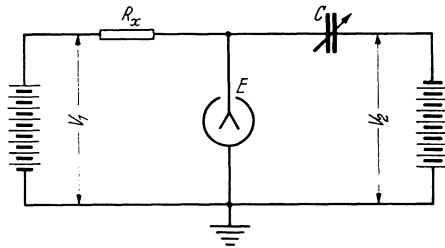


Abb. 43. Elektrometrisches Kompensationsverfahren zur Messung hoher Isolationswiderstände.

$$R = \frac{V_1}{V_2} \cdot \frac{t}{\Delta C}$$

Das Verhältnis  $V_1/V_2$  kann über einen Spannungsteiler fest eingestellt werden. Als Kondensatoren sind Drehkondensatoren ohne Anfangskapazität<sup>4</sup> zu gebrauchen. Das Verfahren ist für die Messung von Widerständen größer als  $10^{12} \Omega$  geeignet. Die Anordnung ist schematisch in der Abb. 43 gezeichnet. An Stelle der Kapazitätsänderung kann die Kompensation bei festem Kapazitätswert durch Änderung der Hilfsspannung über ein Potentiometer erfolgen<sup>2</sup>. Es gilt analog

$$R = \frac{V_1 \cdot t}{\Delta V_2 \cdot C}$$

<sup>1</sup> Technische Anwendungen siehe z. B. bei GOENNINGEN, H.: ETZ Bd. 58 (1937) S. 316. — GASKIN, S. T.: Electrician Bd. 104 (1930) S. 93.

<sup>2</sup> WEIDMANN, F.: Kunststoffe Bd. 28 (1938) S. 141; Bd. 29 (1939) S. 133.

<sup>3</sup> HIGGS, P. J.: J. sci. Instrum. Bd. 10 (1933) S. 169.

<sup>4</sup> ZICKNER, G.: Elektr. Nachr. Tech. Bd. 7 (1930) S. 443.

Eine andere Kompensationsmöglichkeit ist von CURIE<sup>1</sup> angegeben worden. Hier erfolgt die Zuführung bestimmter Elektrizitätsmengen durch stetige Änderung der Belastung eines Piezoquarzes. JÄGER<sup>2</sup> hat einen Urankompensator angegeben, bei dem der durch Blenden regelbare Strom kompensiert wird.

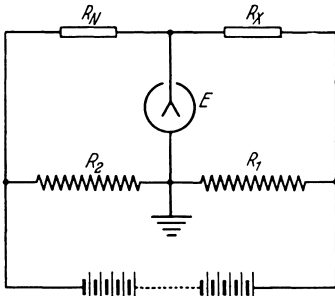


Abb. 44. Wheatstone-Brücke mit Hochohmwiderständen und Elektrometer.

7. *Isolationsmessungen mit Röhrenelektrometer.* Auch Röhrenelektrometer sind für Isolationsmessungen brauchbar. Bekannt ist eine Ausführung unter dem Namen Mekapion<sup>3</sup>, bei der das Gitter einer Röhre durch den Hochohmwiderstand entladen wird bis zu einem Punkt, bei dem der entstehende Anodenstrom ein Signal betätigt und durch Relaiskontakt das Gitter von neuem negativ auflädt. Die auf der Uhr ablesbare Folge von Signalen ist ein Maß für die Isolation. Die 3 letzten Anordnungen finden bei Isolierstoffuntersuchungen in der Technik bis jetzt nur selten Anwendung.

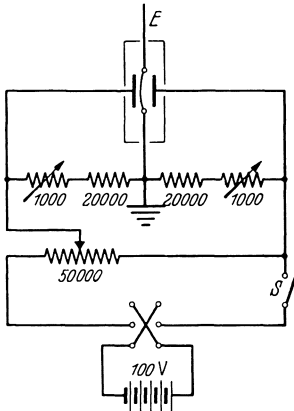


Abb. 45. Regelung der Elektrometerempfindlichkeit durch Spannungsteiler.

8. *Brückenschaltung mit sehr hohen Vergleichswiderständen.* Die Herstellung konstanter Hochohmwiderstände aus äußerst dünnen Schichten Platin oder Silber ermöglicht den direkten Vergleich des Isolationswiderstandes mit einem bekannten Normalwiderstand. Die Hochohmwiderstände nach F. KRÜGER-Greifswald werden durch Verdampfen oder durch Kathodenzerstäubung von Platin oder Silber auf Rohre von Quarz oder Bernstein hergestellt. Die Widerstände können nach Art einer Wheatstoneschen Brücke zusammengebaut werden, wobei als Nullanzeigergerät wiederum ein Elektrometer verwandt werden muß (Anordnung s. Abb. 44). Eine Schaltung zur Änderung der Elektrometerempfindlichkeit durch Hilfsspannungsreglung ist von WEIDMANN<sup>4</sup> (s. Abb. 45) angegeben. Die Regelwiderstände sind kleine Potentiometerwiderstände. Andere Schaltungen siehe z. B. bei TH. WULF.

<sup>1</sup> CURIE: Radioactivité Bd. 1 (1910) S. 95 u. 106; Ann. Chim. Phys. Bd. 17 (1889) S. 392. — RÖNTGEN: Ann. Phys., Lpz. Bd. 41 (1913) S. 449.

<sup>2</sup> JÄGER: Z. Phys. Bd. 52 (1928) S. 627.

<sup>3</sup> Hergestellt von S. Strauß, Wien XVII, Pointengasse 5.

<sup>4</sup> WEIDMANN, F.: Kunststoffe Bd. 28 (1938) S. 141.

Mit den genannten elektrometrischen Meßverfahren können Isolationswiderstände  $>10^{12} \Omega$  gemessen werden. Es sind z. B. in der Abb. 46 die spezifischen Isolationswiderstände in Abhängigkeit von der Temperatur von  $-50^\circ$  bis  $+50^\circ$  von 3 hochwertigen Isolierstoffen wiedergegeben, die bis vor kurzem meßtechnisch nicht erfaßt werden konnten.

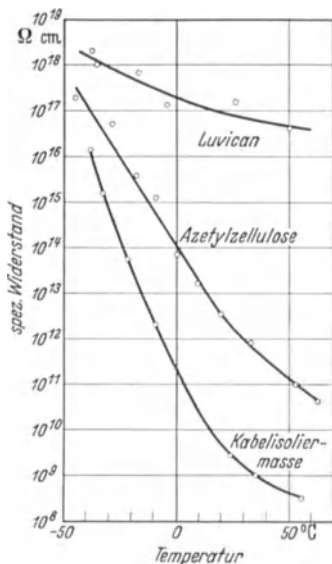


Abb. 46. Spezifischer Isolationswiderstand von drei hochwertigen Isolierstoffen in Abhängigkeit von der Temperatur.

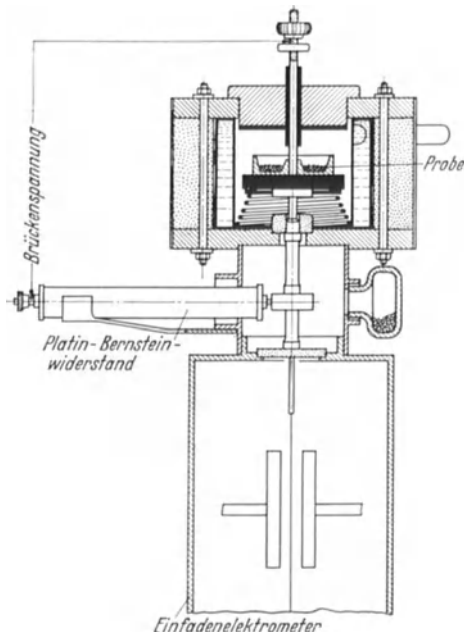


Abb. 47. Elektrometer mit Brückenspannung.

Elektrometer, Vergleichswiderstand und Isolierstoffprüfling sind dabei zu einem leicht bedienbaren, statisch hochisolierten Gerät vereinigt, das im Schnitt in der Abb. 47 wiedergegeben ist<sup>1</sup>.

9. *Isolationsmessungen an Flüssigkeiten.* Während bei festen Isolierstoffen die Kondensatorbelegungen auf den Isolierstoff aufgebracht werden und ihren Halt am Isolierstoff finden, müssen die Schutzringelektroden für Messungen an Flüssigkeiten gegeneinander fest angeordnet und so isoliert sein, daß störende Einflüsse von der Messung ausgeschaltet sind. In der Abb. 48 ist ein Zylinderschutzringkondensator der Physik.-Techn. Reichsanstalt wiedergegeben, der unter der Bezeichnung „Kabelphantom“ für Messungen an Ölen und Kabelmassen in der Kabelindustrie bekannt ist. Das Gerät ist im Schnitt dargestellt. Es besteht aus einem äußeren, während der Messung an Hochspannung liegenden, verchromten Messingzylinder (1) sowie einem inneren, durch keramische Schutzspalte (3)

<sup>1</sup> KLINGELHÖFFER, H. u. N. JASPER: Kunststoffe Bd. 29 (1939) S. 224.

unterteilten ebenfalls verchromten Zylinder (2), der über ein keramisches Isolierstück (4) mit dem Außenteil fest verschraubt ist. Der Mittelteil des Innenzylinders, die Meßelektrode, wird durch eine geschirmte Anschlußleitung mit Stecker (8) mit der Brücke oder dem Galvanometer verbunden. Im Innenzylinder ist ein Widerstandsthermometer (6) vorgesehen, dessen Zuleitung mit einer Steckvorrichtung (7) an ein in  $^{\circ}\text{C}$  geeichtes Kreuzspulinstrument angeschlossen wird. Der

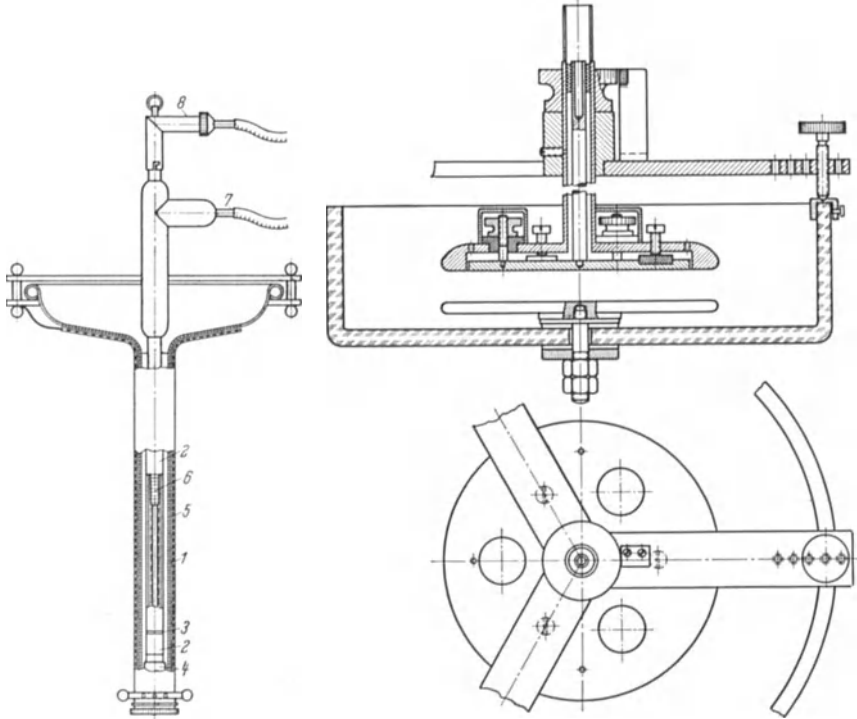


Abb. 48. Ölprüfkondensator.

Abb. 49. Schutzringeletroden im Glasgefäß.

Außenzylinder trägt eine Heizwicklung (5) mit einem Wärmeschutz. Ein in der Skizze nicht gezeichneter röhrenförmiger Thermostat, in dem das Phantom eingehängt wird, gestattet die Einstellung von Temperaturen zwischen  $30$  und  $150^{\circ}$  und die Ausführung von Dauerversuchen, z. B. Alterung von Isolierölen, im Prüfgerät.

In ähnlicher Weise können auch Plattenschutzringkondensatoren für die Untersuchung dünnflüssiger Isolierstoffe verwendet werden, z. B. eine Schutzringeletrode, die unter Zwischenlage von 3 keramischen, auf gleiche Höhe geschliffenen Säulen auf einen ebenen Metallteller aufgesetzt wird. Die keramischen Säulen befinden sich unter dem Schutzring, so daß der eigentliche Meßkondensator nur von dem zu prüfenden

Dielektrikum erfüllt ist. Oder die Schutzringelektrode wird in ein Glasgefäß eingehängt, siehe Abb. 49. Der Nachteil einer horizontalen Anordnung ist, daß Luftblasen unter der Meßelektrode haften und dadurch das Meßergebnis beeinflussen. Auch das Einbringen der ganzen Anordnung in einen Vakuumexsikkator führt nicht mit Sicherheit zur Entfernung aller Lufteingüsse.

Einen Plattenschutzringkondensator senkrechter Bauart zeigt die Abb. 50. Hier sind die oben beschriebenen Nachteile der schweren

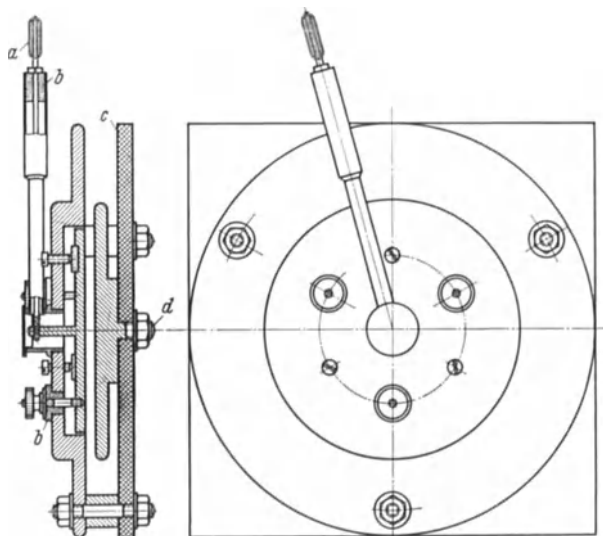


Abb. 50. Plattenschutzringkondensator senkrechter Bauart für flüssige Isolierstoffe.

Entfernung der Lufteingüsse vermieden. Die Verfahren der Messung sind die gleichen wie die für feste Isolierstoffe beschriebenen.

*10. Prüfungen mit der Glimmlampe.* Eine qualitative Prüfung des Stromdurchganges kann mit der Glimmlampe zwischen beliebigen Elektroden erfolgen. Die Anbringung von Schutzringen ist nicht erforderlich.

Bei merklicher Leitfähigkeit tritt ein teilweises oder völliges Leuchten der Lampe ein. Tritt bei der Glimmlampe bei 100 V ein schwaches punktförmiges Leuchten auf, so liegt der geprüfte Widerstand in der Größenordnung von 20 bis 100 M $\Omega$ .

Technische Hilfsmittel für die Messung des Oberflächenwiderstandes und des Isolationswiderstandes. Als Gleichspannungsquellen für die Meßspannung von 1000 V kommen kleine Gleichstrommaschinen, Röhrengleichrichter Bauart Hartmann & Braun, oder wenn nur Gleichstromanschluß von 110 oder 220 V im Laboratorium vorhanden ist, kapazitive Gleichspannungs-Umformer Bauart R. Jahre-Berlin in Betracht. Sie bestehen aus einer Kondensatorenbatterie, die im schnellen

Wechsel durch mechanische Umschalter in Parallelschaltung aufgeladen wird und sodann in Reihenschaltung einen Glättungskondensator auf die Betriebsspannung auflädt. Die Leistung der Gleichspannungsquelle ist durch die Größe der Kondensatoren begrenzt, jedoch für die Isolationsmessungen ausreichend. In einem tragbaren Meßgerät mit Lichtmarkengalvanometer der Firma Hartmann & Braun sind die Empfindlichkeiten des Galvanometers so abgeglichen, daß direkt die Vergleichszahl des Oberflächenwiderstandes abgelesen werden kann. Die gesamte Anordnung

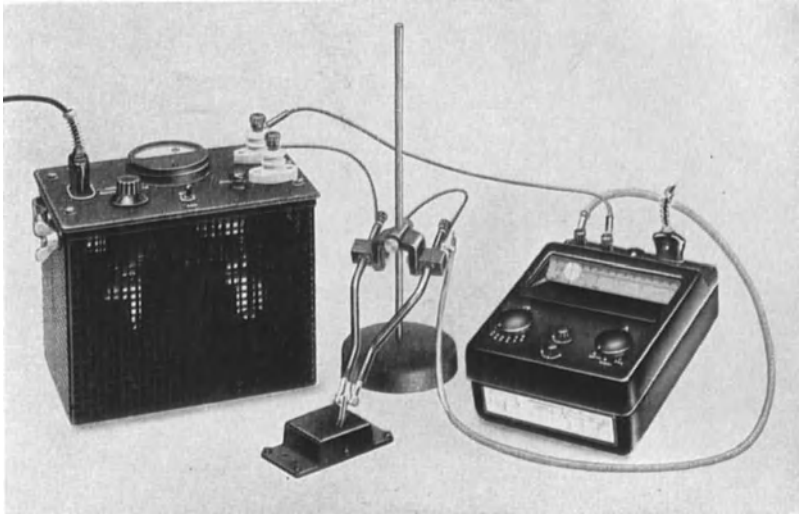


Abb. 51. Einrichtung zur Messung des Oberflächenwiderstandes der Firma Hartmann & Braun.

mit Spannungsquelle zeigt Abb. 51<sup>1</sup>. Die Höhe der Meßspannung ist für das Ergebnis der Untersuchung wegen einer gewissen Spannungsabhängigkeit des Widerstandes von Bedeutung. 1000 V sollten daher nicht unterschritten werden. Messungen bei niederen Spannungen geben einen Anhaltspunkt, sind jedoch für eine Bewertung nicht zweckmäßig. Die Leistung der Spannungsquelle kann für die Isolationsmessungen allein gering (10 W) sein. Meist ist jedoch mit den Isolationsmessungen eine Spannungsprüfung verbunden und die Leistung soll dann ausreichen, um bei Fehlerstellen im Werkstoff einen kräftigen Durchschlag durch das Material zu erzielen, ohne daß infolge der Strombelastung vor dem Durchschlag ein Spannungszusammenbruch eintritt.

Zum Schutze des Galvanometers im Falle eines Durchschlages hat es bis vor kurzem an zuverlässigen Mitteln gefehlt. Ein Röhrenrelais in Verbindung mit einem mechanischen Relais<sup>2</sup> kann das empfindliche

<sup>1</sup> Der Umbau für die neuen Vergleichszahlen ist in Vorbereitung.

<sup>2</sup> DWORECK, O.: Z. VDI Bd. 78 (1934) S. 29 — BROCKDORFF, U. v.: Sicherungen für elektrische Meßinstrumente, ETZ Bd. 60 (1939) S. 1089.



Galvanometer schützen. Sobald das negative Gitterpotential einer Gasentladungsröhre den kritischen Zündwert erreicht hat, wird nach Ansprechen des mechanischen Relais, d. h. nach etwa  $10^{-1}$  s, der Galvanometer-Meßkreis unterbrochen. BAKER und BOLTZ<sup>1</sup> benutzen eine Hochspannungs-Photozelle mit kugelförmigen Natriumelektroden im Meßkreis und begrenzen den Strom durch die Belichtung. Bei Belichtung mit einer 85-W-Quecksilberdampflampe ändert sich der Strom von etwa 100 V ab bis 30 kV nur um 17%, d. h. selbst ein Durchschlag durch den Isolierstoff kann das Galvanometer unmöglich gefährden.

*Megohmmeter.* Ein handliches Gerät für die Messung von Isolationswiderständen mit und ohne Abschirmung ist von der

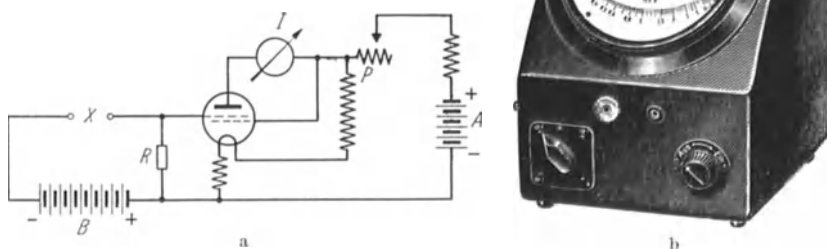


Abb. 52 a und b. Teraohmmeter der Firma R. Jahre, Berlin, mit Schaltanordnung.

Firma General Radio Co., Cambridge A, als Wheatstone-Brücke mit Röhrenvoltmeter entwickelt worden. Es gestattet die schnelle Messung von 0,1 bis 100 M $\Omega$  mit  $\pm 3\%$ , 100 bis 1000 M $\Omega$  mit  $\pm 6\%$  und 1000 bis 10000 M $\Omega$  mit  $\pm 10\%$  Genauigkeit. 1000000 M $\Omega$  kann an der nicht-linearen Skala eben abgelesen werden<sup>2</sup>.

Das Tera-Ohmmeter der Fa. R. Jahre, Berlin, gestattet die Messung von Widerständen von 0,2 bis 50 Millionen M $\Omega$  mit Zeigerinstrument bei einer Meßspannung von 100 V. Das Schaltschema zeigt die Abb. 52a. Der Isolationsstrom, welcher durch den Prüfling fließt, erzeugt am Widerstand R einen Spannungsabfall, so daß die Gitterspannung und damit der Anodenstrom der Elektrometerröhre nur von der Größe des Isolationswiderstandes des Prüflings abhängen. Die äußere Form des handlichen Instrumentes ist aus Abb. 52 b zu ersehen.

Vergleich von Oberflächenwiderstand und Widerstand im Inneren. Der Oberflächenwiderstand der Isolierstoffe ist vorwiegend durch die Verunreinigungen der Oberfläche, Ad- und Absorption von Wasser, Öl oder anderen Flüssigkeiten bedingt. Das Wasser spielt dabei die Haupt-

<sup>1</sup> BAKER, E. B. u. H. A. BOLTZ: Rev. sci. Instrum. Bd. 9 (1938) S. 196.

<sup>2</sup> FIELD, R. F.: Gen. Radio Exper. Bd. 12 (1937) Nr 29, S. 1.

rolle. Es wird aus der Luft aufgenommen und bildet mit gelösten Ionen des Isolierstoffes die Hauptursache der Leitfähigkeit der Oberfläche. Die Leitfähigkeit des Inneren ist bedingt durch den molekularen Aufbau des Stoffes und ist vorwiegend eine Ionenleitfähigkeit. In der folgenden Tabelle sind die Werte des Oberflächenwiderstandes und des spezifischen Widerstandes für einige Isolierstoffe zusammengestellt. Aus der Tabelle geht hervor, daß ein Isolierstoff mit hohem spezifischen Widerstand nicht immer einen hohen Oberflächenwiderstand hat. Der große Einfluß der relativen Luftfeuchtigkeit auf den Oberflächenwiderstand ist schließlich aus Spalte 3 der Tabelle zu erkennen.

Tabelle 8.

Isolierstoff	Spezifischer Widerstand MΩ cm	Spezifischer Oberflächenwiderstand	
		bei 25 % relativer Luftfeuchtigkeit	bei 90 % relativer Luftfeuchtigkeit
		MΩ	MΩ
Elfenbein . . . . .	$2 \cdot 10^2$	$1 \cdot 10^4$	$5 \cdot 10^1$
Zelluloid . . . . .	$2 \cdot 10^4$	$1 \cdot 10^5$	$1 \cdot 10^3$
Marmor . . . . .	$1 \cdot 10^5$	$1 \cdot 10^5$	$1 \cdot 10^1$
Tafelglas . . . . .	$2 \cdot 10^7$	$1 \cdot 10^8$	$2 \cdot 10^1$
Bernstein . . . . .	$5 \cdot 10^{12}$	$1 \cdot 10^9$	$1 \cdot 10^5$
Geschmolzener Quarz <sup>1</sup>	$5 \cdot 10^{12}$	$1 \cdot 10^9$	$1 \cdot 10^2$
Zeresin . . . . .	$5 \cdot 10^{12}$	$1 \cdot 10^{11}$	$1 \cdot 10^{11}$

γ) Dielektrizitätskonstante, dielektrischer Verlustfaktor, spezifische Verlustleistung, Wechselstromwiderstand, Dämpfungszahl, logarithmisches Dämpfungsdekrement.

#### Begriffsbestimmungen.

**1. Kapazität.** In einem Luftkondensator ist die elektrische Feldstärke  $\mathfrak{E}$  proportional der Flächendichte  $\sigma$  der elektrischen Ladungen auf den Kondensatorplatten, d. h. im elektrostatischen Maßsystem ist

$$\mathfrak{E} = 4\pi\sigma.$$

(Der Faktor  $4\pi$  ist durch das Maßsystem bedingt.) Die Spannung  $U$  zwischen zwei parallelen Kondensatorplatten ist gegeben durch  $U = \mathfrak{E} \cdot a$  ( $a$  = Abstand der Kondensatorplatten in cm). Daraus folgt, daß die Spannung  $U = 4\pi\sigma a$  ist und nur von der Flächendichte der Ladungen und dem Abstand  $a$  der Kondensatorplatten abhängt. Die Flächendichte  $\sigma$  ist die Gesamtladungsmenge  $Q$  geteilt durch die Fläche der Kondensatorplatte  $F$ ; somit wird die Spannung am Kondensator

$$U = \frac{Q}{F} \cdot 4\pi a,$$

<sup>1</sup> Hou, C. H.: Oberflächenleitfähigkeit von paraffiniertem Quarz. Rev. Sci. Instr. Bd. 9 (1938) S. 90.

d. h. die Ladung  $Q$  auf einem Kondensator ist gleich der Spannung  $U$  des Kondensators multipliziert mit einem Faktor  $C$ , im vorliegenden Falle mit  $C = \frac{F}{4\pi a}$ . Dieser Faktor heißt die Kapazität der Anordnung; sie ist das Verhältnis von Ladung zu Spannung und kann auf Grund der obigen Zusammenhänge für einfache geometrische Kondensatorformen errechnet werden.

Die Kapazität besitzt in dem elektrostatischen Maßsystem die Dimension einer Länge; die Einheit der Kapazität ist daher das cm.

*Berechnung von Kapazitäten.* Die Ermittlung der Spannung an Kondensatoren mit inhomogenen Feldern erfolgt analog wie beim Plattenkondensator aus der Flächendichte; für einen Zylinderkondensator von der Höhe  $h$ , dem inneren Zylinderradius  $r_1$ , dem äußeren Zylinderradius  $r_2$  gilt

$$U = \frac{4\pi a Q}{F} = \frac{4\pi Q \cdot a}{2\pi r_1 \cdot h}.$$

Die Entfernung  $a = r_2 - r_1$  ist hier abhängig von der Fläche  $F$ . Die Spannung ist demgemäß durch das Linienintegral der Feldstärken längs  $dr$  von  $r_2$  bis  $r_1$

$$\int_{r_1}^{r_2} \frac{4\pi Q dr}{2\pi r h}$$

gegeben; damit wird

$$U = \frac{2Q}{h} \cdot \int_{r_1}^{r_2} \frac{dr}{r} = \frac{2Q}{h} \log \text{nat} \frac{r_2}{r_1}$$

und die Kapazität der Anordnung in cm

$$C = \frac{h}{2 \log \text{nat} \frac{r_2}{r_1}}.$$

Die Formel gilt, wenn  $h$  groß gegen den inneren Radius  $r_1$  ist, was bei den Prüfkörpern im allgemeinen der Fall ist. Die Länge  $h$  ist von Mitte Schutzspalt bis Mitte Schutzspalt zu messen.

Für den Plattenschutzringkondensator gilt

$$C = \frac{d^2}{16a},$$

wobei  $d$  der Durchmesser der Meßbelegung, gemessen von Mitte Schutzspalt bis Mitte Schutzspalt, bedeutet.

Für den Dreiplattenkondensator gilt

$$C = \frac{r^2}{2a},$$

wobei  $r$  der Radius der mittleren Belegung und  $a$  der Abstand von jeder äußeren Platte ist. Der Radius der beiden äußeren Belegungen ist groß

gegen den Radius der mittleren Belegung. Für Isolierstoffuntersuchungen wird als mittlere Belegung eine Folie aus Metall zwischen zwei gleich dicke Isolierstoffplatten gepreßt, die außen mit großen Elektroden versehen sind.

Die angegebenen Formeln sind Näherungsformeln, die sich unter Vernachlässigung der Ladungen der Ränder der Kondensatoren ergeben. Für die Berechnung der Dielektrizitätskonstanten von Isolierstoffen (s. diese Seite, Ziffer 2) sind sie ausreichend<sup>1</sup>. Für den Fall, daß die Elektroden mit der Prüfplatte abschneiden, sind in den amerikanischen Vorschriften ASTM die nach den Kirchhoffschen Gleichungen<sup>2</sup> errechneten Korrekturen für verschiedene Verhältnisse von Dicke der Elektrode zu Dicke der Platte in Abhängigkeit von dem Verhältnis Dicke zu Durchmesser der Platte errechnet und graphisch wiedergegeben.

Durch Ladung und Spannung ist das elektrische Feld und damit die Kapazität bestimmt, wie in ganz analoger Weise bei der strömenden Elektrizität durch das Ohmsche Gesetz durch Strom und Spannung der elektrische Widerstand festgelegt ist. Bei gegebener Spannung  $U$  kann mithin ein Kondensator nur eine bestimmte Elektrizitätsmenge aufnehmen, die der Kapazität verhältnismäßig ist. Die *praktische* Einheit der Kapazität ist das Farad (F). Ein Kondensator, der durch die Einheit der Elektrizitätsmenge von 1 Coulomb (C) auf die Spannung 1 V aufgeladen wird, hat die Kapazität 1 F. Benutzt wird in der Praxis  $1 \mu\text{F} = 10^{-6} \text{ F}$ ,  $1 \text{ nF} = 10^{-9} \text{ F}$ , und  $1 \text{ pF} = 1 \mu\mu\text{F} = 10^{-12} \text{ F}$ . Für die Umrechnung der elektrostatischen Kapazitätseinheit in das praktische Maßsystem gilt

$$1 \text{ cm} = 1,11 \text{ pF}.$$

**2. Dielektrizitätskonstante.** Das Verhältnis von Ladung zu Spannung ist ein Maß für die Kapazität  $C$  eines Kondensators. Wenn man den gleichen Kondensator einmal mit Luft, ein anderes Mal mit einem anderen Isolierstoff füllt, erhält man verschiedene Werte für das Verhältnis von Ladung zu Spannung. Bezeichnet  $C_0$  die Kapazität der Anordnung mit Luft als Dielektrikum, so liefert das Verhältnis  $C/C_0$  für jeden Isolierstoff eine Kennziffer, die unabhängig ist von der Elektrodengröße, der Dicke der Isolierstoffplatte und der Spannung. Diese Kennziffer heißt Dielektrizitätskonstante. Sie ist allerdings keine Konstante, wie man früher vermutete, sondern abhängig von der Frequenz, Temperatur u. a.

<sup>1</sup> Genauere Berechnungen von Kondensatoren siehe bei COFFIN: Proc. Amer. Acad. Bd. 39 (1903) S. 415. — ROSA u. DORSEY: Bull. Bur. Stand. Bd. 3 (1907) S. 433. — WOODROW: Phys. Rev. Bd. 35 (1913) S. 434. — GRÜNEISEN u. GIEBE: Verh. dtsh. phys. Ges. 1912, S. 921. — KAUFMANN: Phys. Z. 1907, S. 75. — PALMER, H. B.: Electr. Engng. Bd. 56 (1937) S. 363.

<sup>2</sup>  $C = \frac{d^2}{16a} + \frac{d}{8\pi} \left( \log \text{nat} \left[ \frac{16\pi d(a+b)}{a^2} \right] + \frac{b}{a} \log \text{nat} \left[ \frac{a+b}{b} \right] - 3 \right)$   
( $b$  = Dicke der Elektrode).

Wählt man bei einer Breite des Schutzspaltes von 1 mm für den Durchmesser der Meßbelegung in der Plattenschutzringanordnung (2r in Abb. 28, S. 66) die in der Tabelle 9 genannten Werte, so ergibt sich die Dielektrizitätskonstante des Isolierstoffes aus der in pF gemessenen Kapazität  $C$  der Anordnung und dem Abstand  $a$  der Elektroden in Zentimeter zu

$$\varepsilon = K \cdot a \cdot C.$$

Die Konstante  $K$  ist in der Tabelle 9 für verschiedene Durchmesser der Meßbelegung angegeben.

Bei kleineren Durchmessern der Meßbelegung ist die Breite des Schutzspaltes von großem Einfluß auf die Kapazität der Anordnung und damit auch auf die Dielektrizitätskonstante.

**3. Leistungsfaktor.** Wird an einen Kondensator mit Luft als Dielektrikum eine Wechselspannung  $U = U_0 \sin \omega t$  gelegt, so ist der durch den Kondensator fließende Strom  $I = U_0 \omega C_0 \cos \omega t$  um  $90^\circ$  gegen die Spannung phasenverschoben. Der Strom eilt der Spannung um  $90^\circ$  voraus.  $\omega = 2 \pi f$  heißt Kreisfrequenz,  $f =$  Frequenz ist die Anzahl der Perioden je s. Enthält der Kondensator ein festes oder flüssiges Dielektrikum, so tritt im Dielektrikum ein Energieverlust auf. Der Strom eilt nicht mehr um genau  $90^\circ$ , sondern um einen Winkel  $\varphi = 90^\circ - \delta$  voraus. Die im Isolierstoff verbrauchte, vorwiegend in Wärme umgesetzte Verlustleistung ist gegeben durch  $N = UI \cdot \cos \varphi$ .  $\cos \varphi$  heißt Leistungsfaktor.

**4. Dielektrischer Verlustfaktor.** Der dielektrische Verlustfaktor ist der  $\operatorname{tg}$  des Winkels  $\delta$ , der den Leistungswinkel  $\varphi$  zu  $90^\circ$  ergänzt (s. Abschnitt 3).

Da der Leistungswinkel  $\varphi$  jedoch im allgemeinen sehr wenig von  $90^\circ$  abweicht, ist der Komplementwinkel sehr klein. Der  $\operatorname{tg} \delta$  ist dementsprechend auch eine kleine Zahl; die Verlustfaktoren der Mehrzahl der Isolierstoffe liegen zwischen 0,5 und 0,0001.

Aus Brückenmessungen ergibt sich oft direkt der Verlustfaktor  $\operatorname{tg} \delta$ .

Der Winkel  $\delta$  kann theoretisch schwanken zwischen 0 und  $90^\circ$  und dementsprechend der Verlustfaktor zwischen den Werten 0 und  $\infty$ .

Bei kleinen Verlustfaktoren pflegt man die Angabe der Zahl dadurch zu vereinfachen, daß man entsprechend dem Tausendersystem die Einheiten der 3. Stelle mit dem Faktor  $10^{-3}$  angibt.

Zuweilen werden auch die Verlustfaktoren in Einheiten der 4. oder 2. Stelle mit dem Faktor  $10^{-4}$  bzw.  $10^{-2}$  angegeben. Mit Rücksicht darauf, daß in der Physik wie in der Technik das Tausendersystem für die Größenordnung eingeführt ist (z. B. bei der Abstufung der

Tabelle 9.

Durchmesser der Meßbelegung in mm	Konstante $K$
119	0,1
83,9	0,2
74,9	0,25
68,3	0,3
64,7	0,33
59,0	0,4
52,6	0,5

Gewichte mg, g, kg, t; der Länge m, km; der Kapazität pF,  $\mu$ F, nF, F und vielen anderen), sind diese Angaben möglichst zu vermeiden.

Der Winkel  $\delta$  heißt dielektrischer Verlustwinkel. Da vielfach dieser Verlustwinkel angegeben wird, ist in der Tabelle 10 die goniometrische

Tabelle 10.

$\delta$		tg $\delta$	sin $\delta = \cos \varphi$
Grad	min		
0	1	0,0003	
	10	0,0029	
	20	0,0058	
	30	0,0087	
	40	0,0116	
	50	0,0145	
1		0,0175	
2		0,0349	
3		0,0524	0,0523
4		0,0699	0,0698
5		0,0875	0,0872
6		0,1051	0,1045
7		0,1228	0,1219
8		0,1405	0,1392
9		0,1584	0,1564
10		0,1763	0,1736

Funktion für die Winkel von 1' bis  $10^\circ$  aufgeführt. Für kleine Winkel ist  $\text{tg } \delta \approx \sin \delta = \cos \varphi$ . Wesentliche Abweichungen treten auf für  $\text{tg } \delta > 0,1$ .

Ein verlustbehafteter Kondensator kann durch einen verlustlosen Kondensator  $C_2$  mit Luft als Dielektrikum und einen Parallelwiderstand  $R$  oder einen verlustlosen Kondensator  $C_1$  und einen Reihenwiderstand  $r$  ersetzt werden.  $1/R = G$  heißt die Ableitung eines Kondensators. Für diese zwei Ersatzschaltungen kann man nach der bekannten vektoriellen Darstellung der Wechselströme die Diagramme zeichnen.

In der Parallelschaltung geht man aus vom vorgegebenen Spannungsvektor  $U_0$  und findet graphisch die Lage und Größe des Stromvektors  $I_0$  wie folgt: Die Spannung  $U_0$  bewirkt im Kondensator  $C_2$  einen Strom  $U_0 \omega C_2$  senkrecht zum Vektor  $U_0$ , während der Strom  $U_0/R$  durch den Widerstand  $R$  in Phase mit dem Spannungsvektor  $U_0$  verläuft. Die graphische Addition ergibt nach Größe und Phase den gesuchten Vektor  $I_0$  (Abb. 53).

In der Reihenschaltung geht man aus vom vorgegebenen Stromvektor  $I_0$  und konstruiert dazu die Spannungsabfälle im Kondensator und im Widerstand, um durch vektorielle Addition graphisch den zugehörigen Spannungsvektor  $U_0$  zu finden. Senkrecht zu  $I_0$  und um  $90^\circ$  nacheilend ist der Spannungsabfall  $I_0/\omega C_1$  aufzutragen, dazu zu addieren in Phase mit  $I_0$  der Spannungsabfall  $I_0 r$  (Abb. 54).

Aus den Abb. 53 und 54 folgt, daß die beiden Kondensatoren, die den zwei Ersatzschaltungen zugrunde gelegt sind, ebenso wie die Widerstände, einander nicht gleich sind, und zwar ist für die

$$\text{Reihenschaltung: } C_1 = \frac{I_0}{U_0 \omega} \frac{1}{\cos \delta}; \quad \text{tg } \delta = r \omega C_1,$$

$$\text{Parallelschaltung: } C_2 = \frac{I_0}{U_0 \omega} \cos \delta; \quad \text{tg } \delta = \frac{1}{R \omega C_2},$$

daraus folgt, daß sich die beiden Kondensatoren verhalten wie

$$\frac{C_1}{C_2} = \frac{1}{\cos^2 \delta} = 1 + \operatorname{tg}^2 \delta.$$

Welche der zwei Vorstellungen den tatsächlichen Verhältnissen entspricht, darüber gibt die Theorie keine Auskunft. In Wirklichkeit wird sehr oft die vereinfachte Annahme nicht zutreffen. Bei hohen

Leitfähigkeiten ist die Ersatzschaltung nach Abb. 53 (Parallelschaltung) sinngemäßer. Bei großen Verlustfaktoren ist mithin der Begriff der Kapazität und der daraus abgeleiteten Dielektrizitätskonstanten nicht mehr bestimmt. Die Kapazität geht unter Umständen stetig in einen Widerstand über. Ein Beispiel hierfür bilden die keramischen Massen, die bei Raumtemperatur ausgezeichnete Nichtleiter sind, bei Temperaturen von 600° an jedoch einen hohen dielektrischen Verlustfaktor aufweisen

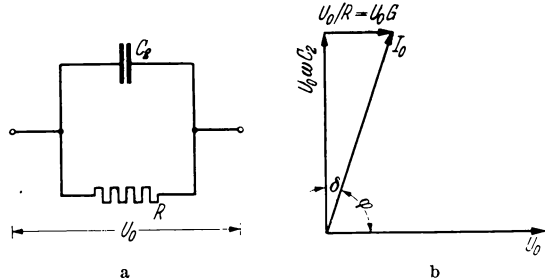


Abb. 53 a und b. Ersatz eines verlustbehafteten Kondensators durch einen verlustlosen mit parallel geschaltetem Widerstand (a) und entsprechendem Vektordiagramm (b).

und nach Abkühlung wieder den alten dielektrischen Zustand erreichen. Der durch die Massen bei 600° fließende Blindstrom  $U\omega C$  ist gegenüber dem Wirkstrom  $U/R$  zu vernachlässigen, so daß der Scheinstrom  $I = \sqrt{\frac{U^2}{R^2} + U^2\omega^2 C^2}$  praktisch gleich dem Wirkstrom ist. Der Scheinstrom wird mit den üblichen Wechselstromzeigerinstrumenten ermittelt.

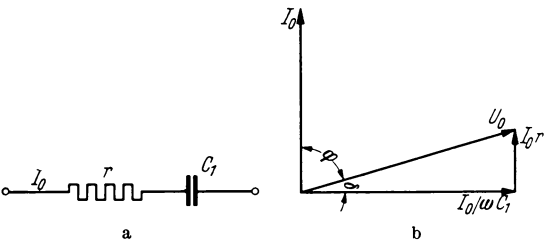


Abb. 54 a und b. Ersatz eines verlustbehafteten Kondensators durch einen verlustlosen in Reihe mit einem Widerstand (a) und entsprechendem Vektordiagramm (b).

**5. Dielektrische Verlustleistung.** Die von einem Wechselstrom erzeugte Leistung ist gegeben durch  $N = UI \cos \varphi$ . Aus dem Diagramm der Abb. 53 folgt für die im Kondensator verbrauchte Leistung  $N = U^2 \omega C \frac{\cos \varphi}{\sin \varphi}$  oder  $N = U^2 \omega C \operatorname{tg} \delta$ ; da die Wirkleistung  $N_W = U^2/R$ , die Blindleistung  $N_B = U \cdot I \cdot \sin \varphi = U^2 \omega C$  ist, folgt für das Verhältnis Wirkleistung zu Blindleistung  $\frac{1}{R \omega C} = \operatorname{tg} \delta$ . Aus dieser Definition des Verlustfaktors als Quotient zweier Größen hat sich die Angabe des

Zahlenwertes als *Verlustziffer* in % eingeführt. Die Verwendung ist nach dem unter 4. Gesagten möglichst zu vermeiden.

**6. Spezifische Verlustleistung und Wechselstromwiderstand.** Da die Verlustleistung  $N = U^2 \omega C \operatorname{tg} \delta$  von der Form und Größe des Prüfkondensators abhängig ist, führt man in diese Gleichung die Dielektrizitätskonstante  $\varepsilon$  des Isolierstoffes ein und schreibt  $N = U^2 \omega C_0 \varepsilon \operatorname{tg} \delta$ .

Die Verluste sind mithin proportional dem Produkt  $\varepsilon \operatorname{tg} \delta$ . Wenn vorausgesetzt wird, daß die dielektrischen Verluste überall gleichmäßig im Isolierstoff vorhanden sind, beträgt die Verlustleistung im Plattenkondensator mit der Fläche  $F$  in  $\text{cm}^2$  und dem Plattenabstand  $a$  in  $\text{cm}$

$$N = \frac{U^2 \omega F}{3,6 \pi a} \varepsilon \operatorname{tg} \delta \cdot 10^{-12}.$$

Mithin ergibt sich die Verlustleistung je  $\text{cm}^3$  als

$$N/\text{cm}^3 = \frac{\omega}{3,6 \pi} \varepsilon \operatorname{tg} \delta \cdot \left(\frac{U}{a}\right)^2 \cdot 10^{-12}.$$

Das Verhältnis von  $U/a$  bedeutet in der Elektrotechnik die Feldstärke, die im Inneren des Kondensators herrscht. In der vorliegenden Rechnung ist dieser Wert in  $\text{V/cm}$  einzusetzen, um die Verluste in  $W$  zu erhalten. Wird die Feldstärke in  $\text{kV/cm} = \mathcal{E}$  gemessen, so ist die rechte Seite der Gleichung mit 1000 zu multiplizieren, entsprechend

$$N/\text{cm}^3 = \frac{\omega}{3,6 \pi} \varepsilon \operatorname{tg} \delta \cdot \mathcal{E}^2 \cdot 10^{-8} = 0,555 \cdot f \cdot \varepsilon \cdot \operatorname{tg} \delta \cdot \mathcal{E}^2 \cdot 10^{-9}.$$

Die Verlustleistung ist also abhängig von der Feldstärke. Bezieht man sie auf die Feldstärke 1, so ist es möglich, eine spezifische Verlustleistung für jeden Isolierstoff anzugeben.

Für die Effektivwerte von Strom und Spannung gilt analog dem Ohmschen Gesetz  $I = U/S$ , wobei  $S$  der sog. Wechselstrom-Scheinwiderstand oder Impedanz ist. Für die Leistung gilt entsprechend  $N = U^2/R$ . Der reziproke Wert von  $R$  wird mit  $G$  bezeichnet und die Ableitung des Kondensators genannt (s. Abb. 53). Führt man auch hier den spezifischen Wirkwiderstand  $\varrho$  aus

$$R = \varrho \cdot \frac{a}{F}$$

ein und bezeichnet den reziproken Wert  $1/\varrho$  als die spezifische *Wechselstromwirkleitfähigkeit*  $\sigma$ , so folgt für

$$N = \frac{U^2 F}{a} \cdot \sigma = F a \sigma \left(\frac{U}{a}\right)^2.$$

Aus dieser Gleichung folgt für die in einem  $\text{cm}^3$  eines Dielektrikums umgesetzte Verlustleistung

$$N/\text{cm}^3 = \sigma \left(\frac{U}{a}\right)^2.$$



Setzt man diesen Wert der oben aus den dielektrischen Verlusten errechneten Verlustleistung gleich, so folgt für die Wechselstromwirkleitfähigkeit

$$\sigma = \frac{\omega \varepsilon \operatorname{tg} \delta}{3,6 \cdot \pi} \cdot 10^{-12} = 0,555 f \cdot \varepsilon \cdot \operatorname{tg} \delta \cdot 10^{-12}.$$

Die Wechselstromwirkleitfähigkeit wird, da sie wie reine Ohmsche Leitfähigkeit von der Feldstärke unabhängig ist, gelegentlich auch spezifischer Leistungsverlust, das Produkt  $\varepsilon \cdot \operatorname{tg} \delta$  auch Verlustziffer genannt.

**7. Dämpfungszahl (Dämpfungsziffer, Dämpfungsfaktor) und logarithmisches Dämpfungsdekrement.**

Werden elektrische Isolierstoffe in Hochfrequenzkreisen benutzt, so bewirken die Energieverluste im Dielektrikum eine Dämpfung der elektrischen Schwingungen. Als sog. Dämpfungsdekrement bezeichnet man das Verhältnis zweier Stromamplituden im zeitlichen Abstand einer Schwingung voneinander. Der Zusammenhang des Dämpfungsdekrementes mit dem dielektrischen Verlustfaktor ergibt sich aus der Theorie der elektrischen Schwingungen. Ein Kondensator mit der Ladung  $Q$  entlädt sich durch einen rein Ohmschen Widerstand  $R$  und die Selbstinduktion  $L$  (Abb. 55). Da die Spannung in dem geschlossenen Kreis in jedem Augenblick Null sein muß, folgt die Spannungsgleichung

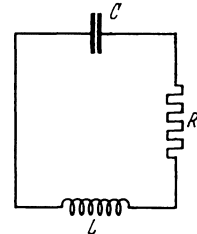


Abb. 55. Schwingungskreis, bestehend aus Selbstinduktion, Kondensator und Widerstand.

$$\text{Spannung am Kondensator} - \text{Spannung an der Spule} - \text{Spannung am Widerstand} = 0$$

oder als Formel

$$Q - L \frac{dI}{dt} - I \cdot R = 0.$$

Da die Änderung der Ladung eines Kondensators definitionsgemäß gleich dem Strom ist, oder mathematisch ausgedrückt  $-dQ/dt = I$ , ergibt sich die bekannte Differential-Schwingungsgleichung

$$\frac{d^2Q}{dt^2} + \frac{R}{L} \cdot \frac{dQ}{dt} + \frac{Q}{LC} = 0,$$

oder anders geschrieben

$$\frac{d^2I}{dt^2} + \frac{R}{L} \frac{dI}{dt} + \frac{I}{LC} = 0.$$

Die Integration dieser Gleichung ergibt die Lösung

$$I = I_0 \cdot e^{-\frac{R}{2L} \cdot t} \cdot \cos \omega t,$$

wobei  $\omega = \text{Kreisfrequenz} = 2\pi \frac{1}{T}$  ( $\frac{1}{T} = f$  Frequenz;  $T = \text{Schwingungsdauer}$ ) bedeuten.  $\frac{R}{2L} = \Delta$  wird mit Schwingungszahl, -ziffer oder -faktor bezeichnet.

$$I = I_0 e^{-\Delta t} \cos \omega t$$

ergibt für  $t=0$  und für  $t=T$  die Werte für die zwei Amplituden

$$\begin{aligned} I_1 &= I_0 \\ I_2 &= I_0 e^{-\Delta T}. \end{aligned}$$

Ihr Verhältnis  $I_1/I_2 = e^{\Delta T}$  ist das Dekrement.

Der natürliche Logarithmus dieses Amplitudenverhältnisses heißt logarithmisches Dämpfungsdekrement  $\vartheta$  und ist gleich

$$\Delta T = \frac{\Delta}{f} = \Delta \frac{2\pi}{\omega}.$$

Da  $\Delta = \frac{R}{2L}$  ist, folgt  $\vartheta = \frac{\pi R}{\omega L}$ ;  $\frac{R}{\omega L}$  ist jedoch der Verlustfaktor einer Spule, so daß das logarithmische Dämpfungsdekrement  $\vartheta = \pi \operatorname{tg} \delta$  ist.

Wie für die Ersatzschaltung eines nichtverlustfreien Kondensators auf S. 95 läßt sich auch für einen Schwingungskreis nach Abb. 56 das Zeigerdiagramm entwerfen und die Phasenverschiebung zwischen Spannung am Schwingungskreis und Strom in der Selbstinduktion und im Kondensator ablesen. Die vektorielle Darstellung setzt eine Selbstinduktion mit der Ableitung  $G_L$  und einen Kondensator mit der Ableitung  $G_C$  voraus, an deren Stromverzweigung die Spannung  $U$  liegt. Das Diagramm ist in der Abb. 57 gezeichnet. Für den Resonanzfall ergibt sich, daß  $\omega L = 1/\omega C$  ist, d. h. die Spannung am Schwingungskreis ist in Phase mit dem erregenden Strom (s. Abb. 58). Beträgt die Phasenverschiebung zwischen Strom  $I$  und Spannung  $U$   $45^\circ$ , so folgt aus dem Zeigerdiagramm (Abb. 59), daß

$$G_C + G_L = \left| \omega C - \frac{1}{\omega L} \right| \quad (1)$$

ist, d. h. der Scheinleitwert ist auf den  $\sqrt{2}$ -fachen Wert gegenüber der Resonanz gewachsen. Wird die Verstimmung eines Resonanzkreises auf diesen Wert durch Änderung der Frequenz, der Kapazität oder der Induktivität erreicht, so folgt aus Gleichung (1) für diese drei Fälle, daß

$$G_C + G_L = \omega C \begin{cases} 2 \Delta \omega / \omega_0 \\ \Delta C / C_0 \\ \Delta L / L_0 \end{cases} \quad (2)$$

ist. Am Resonanzanzeigergerät kann diese Verstimmung durch Erniedrigung des Ausschlages auf den  $\sqrt{2}$ -fachen Wert eingestellt werden. Es gilt dann

$$\frac{G_C + G_L}{\omega C} = \frac{\text{Wirkleitwert}}{\text{Blindleitwert}} = \operatorname{tg} \delta = \begin{cases} 2 \Delta \omega / \omega_0 \\ \Delta C / C_0 \\ \Delta L / L_0 \end{cases} \quad (3)$$

Die analogen Überlegungen gelten auch für einen Schwingungskreis mit Selbstinduktion und Kapazität in Reihenschaltung. Es ergibt sich hierfür

$$R_L + R_C = \left| \omega L - 1/\omega C \right|. \quad (4)$$

Wird hier die Spannung am Resonanzanzeigerät um den  $\sqrt{2}$ -fachen Wert durch Änderung der Frequenz, der Kapazität oder der Induktivität vorgenommen, so lauten die entsprechenden Gleichungen

$$\frac{R_L + R_C}{\omega L} = \frac{\text{Wirkwiderstand}}{\text{Blindwiderstand}} = \text{tg } \delta = \begin{cases} 2 \Delta \omega / \omega_0 \\ \Delta C / C_0 \\ \Delta L / L_0 \end{cases}$$

Nach diesen Verfahren können die Verluste von Schwingungskreisen oder Kondensatoren ermittelt werden.

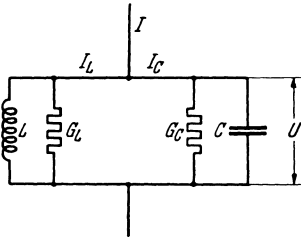


Abb. 56. Schwingungskreis mit Ableitung  $G_L$  und  $G_C$ .

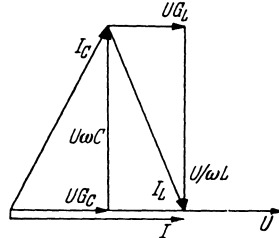


Abb. 58. Diagramm des Schwingungskreises bei Resonanz.

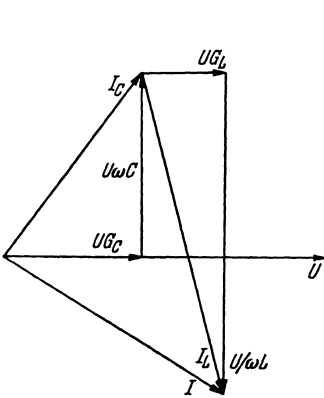


Abb. 57. Diagramm des Schwingungskreises.

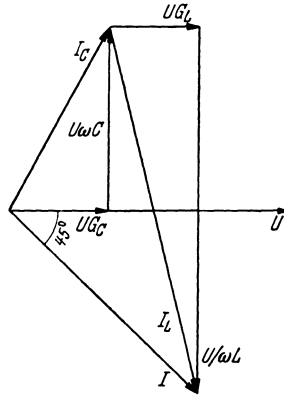


Abb. 59. Diagramm des Schwingungskreises bei  $45^\circ$  Phasenverschiebung zwischen Strom und Spannung.

**8. Kapazität und dielektrischer Verlustfaktor einer Kombination mehrerer Kapazitäten.** Der Verlustfaktor einer durch Parallelschaltung von zwei bzw.  $n$  Kondensatoren gebildeten Kombination ergibt sich zu

$$\text{tg } \delta = \frac{C_1 \text{tg } \delta_1 + C_2 \text{tg } \delta_2}{C_1 + C_2}$$

bzw.

$$\text{tg } \delta = \frac{\sum_{\nu=1}^n C_\nu \text{tg } \delta_\nu}{\sum_{\nu=1}^n C_\nu}$$

Die Ableitung der Anordnung ist

$$G = \sum_{v=1}^n G_v,$$

die Kapazität der Anordnung

$$C = \sum_{v=1}^n C_v.$$

Liegen zwei Kondensatoren in Reihe, so ist der resultierende Verlustfaktor

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{c_1 \operatorname{tg} \delta_2 + c_2 \operatorname{tg} \delta_1}{c_1 + c_2}$$

und die Ableitung der Anordnung

$$g = \frac{g_1 c_2^2 + g_2 c_1^2}{(c_1 + c_2)^2}.$$

Die resultierende Kapazität ergibt sich zu

$$C = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2}.$$

Liegen  $n$  Kondensatoren in Reihe, so ist der resultierende Verlustfaktor

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{\sum_{v=1}^n \frac{\prod_{v=1}^n C_v}{C_v}}{\sum_{v=1}^n \frac{\prod_{v=1}^n C_v}{C_v}} \cdot \operatorname{tg} \delta_v$$

und die resultierende Kapazität

$$C = \frac{\prod_{v=1}^n C_v}{\sum_{v=1}^n \frac{\prod_{v=1}^n C_v}{C_v}}.$$

**9. Zusammenhang der elektrischen mit den optischen Größen.** Zwischen der elektrisch gemessenen Dielektrizitätskonstanten  $\varepsilon$  und den optischen Brechungsexponenten  $n$  besteht die MAXWELLSche Beziehung  $n^2 = \varepsilon$ , wobei  $n = n(1 - j\kappa)$  ist.  $\kappa$  ist der optische Absorptionsindex, s. S. 257. Für ein leitendes Dielektrikum ergibt sich die Dielektrizitätskonstante als komplexe Größe  $\varepsilon = \varepsilon' - j\varepsilon''$ . Aus diesen Gleichungen folgt  $\varepsilon' = n^2(1 - \kappa^2)$  und  $\varepsilon'' = 2nk$ .  $k = n\kappa$  ist der Absorptionskoeffizient und gibt die Schwächung der auffallenden Welle im Dielektrikum an.  $\varepsilon'$  hat die Bedeutung der Dielektrizitätskonstanten eines äquivalenten absorptionsfreien Isolierstoffes.  $\varepsilon''$  ist ein Maß für die Verluste. Es gilt

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{\varepsilon''}{\varepsilon'} = \frac{2\kappa}{1 - \kappa^2}.$$

Brückenmethoden<sup>1</sup>.

**Allgemeines über Wechselstrombrücken.** 1. Berechnung von Brückenverzweigungen. Die einfachste Brückenschaltung besteht

<sup>1</sup> KRÖNERT, J.: Meßbrücken und Kompensatoren. Berlin-München: R. Oldenbourg 1935. — HAGUE, B.: A. c. bridge methods. London: Pitman & Sons Ltd. 1930.

nach Abb. 60 aus 6 Leitungselementen, die zusammen 4 Stromverzweigungen bilden, wobei in jeder Stromverzweigung 3 Leiter verbunden sind. Ein Leitungselement enthält eine Spannungsquelle  $E$ . Drei miteinander im Dreieck verbundene Leitungselemente bilden ein Widerstands-dreieck. Die Brückenschaltung besteht aus 3 geschlossenen Widerstands-dreiecken. Aus der Theorie der Leitungsnetze ist bekannt, daß  $n$  Leiter, die sich in  $m$  Punkten berühren,  $(n - m + 1)$  Widerstands-dreiecke bilden. Der Strom in jedem einzelnen Leiter ist wie folgt zu berechnen. Nach dem Ohmschen Gesetz muß die Spannung in einem Widerstands-dreieck gleich der eingepprägten elektromotorischen Kraft oder gleich 0 sein; d. h.

$$\begin{aligned} I_3 R_3 + I_4 R_4 + I_6 R_6 &= E \\ I_2 R_2 - I_3 R_3 + I_5 R_5 &= 0 \\ I_1 R_1 - I_4 R_4 - I_5 R_5 &= 0, \end{aligned}$$

wobei die Vorzeichen entsprechend der gewählten Stromrichtung festgelegt sind. Ferner folgt aus den Kirchhoffschen Regeln für die Ströme, daß

$$\begin{aligned} -I_2 - I_3 + I_6 &= 0 \\ -I_1 + I_2 - I_5 &= 0 \\ +I_1 + I_4 - I_6 &= 0. \end{aligned}$$

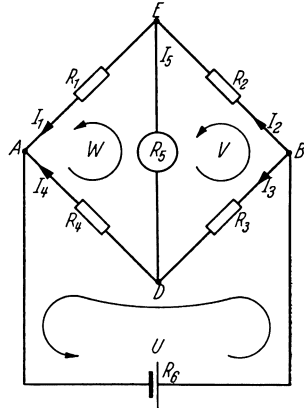


Abb. 60. Widerstandsbrückenschaltung.

Aus den 6 Gleichungen können die 6 Unbekannten nach dem algebraischen Rechenverfahren ermittelt werden. Die Rechnung kann nach MAXWELL<sup>1</sup> durch Einführung der „Kreiszyklen“ für die 3 Widerstands-dreiecke vereinfacht werden. Nach MAXWELL fließt in jedem Widerstands-dreieck entsprechend dem in der Abb. 60 angegebenen Umlaufssinn ein Kreisstrom  $u, v$  bzw.  $w$ . Die Ströme in den einzelnen Leitern sind dann gleich der Differenz der zwei Kreisströme, die das Leiterelement durchfließen, d. h.

$$I_5 = v - w, \quad I_4 = u - w, \quad I_3 = u - v. \tag{5}$$

Für die Widerstands-dreiecke mit den Kreisströmen gilt das Ohmsche Gesetz, wenn für die Widerstände der Dreieckseiten, die keinem zweiten Widerstands-dreieck angehören, die Summe der Widerstände eingesetzt wird. Mithin gilt

$$\left. \begin{aligned} (R_3 + R_4 + R_6)u - R_3v - R_4w &= E \\ -R_3u + (R_2 + R_3 + R_5)v - R_5w &= 0 \\ -R_4u - R_5v + (R_1 + R_4 + R_5)w &= 0. \end{aligned} \right\} \tag{6}$$

Diese 3 Gleichungen sind mit Hilfe von Determinanten nach  $u, v$  oder  $w$  aufzulösen und liefern nach den Gleichungen (5) die Ströme in den

<sup>1</sup> MAXWELL, J. C.: A Treatise on Electricity and Magnetism Bd. 1, 3. Ausg., S. 406 u. 475. 1892.

Brückenzweigen. Im allgemeinen ist der Strom  $I_5$  durch das Anzeigergerät von Interesse. Führt man für  $v = w + I_5$  in Gleichung (6) ein, so ergibt sich

$$I_5 = \frac{\begin{array}{ccc} E & -(R_3 + R_4) & R_3 + R_4 + R_6 \\ 0 & R_2 + R_3 & -R_3 \\ 0 & R_1 + R_4 & -R_4 \end{array}}{\begin{array}{ccc} -R_3 & -(R_3 + R_4) & R_3 + R_4 + R_6 \\ R_2 + R_3 + R_5 & R_2 + R_3 & -R_3 \\ -R_5 & R_1 + R_4 & -R_4 \end{array}}$$

oder wenn die Determinante im Nenner gleich  $\Delta$  gesetzt wird

$$I_5 = \frac{R_1 R_3 - R_2 R_4}{\Delta} \cdot E.$$

Für die abgeglichene Brücke ist  $I_5 = 0$  und mithin

$$R_1 R_3 = R_2 R_4. \quad (7)$$

Die gleichen Ableitungen gelten auch, wenn für die Gleichstromgrößen  $R_1$  bis  $R_6$  die vektoriellen Wechselstromsymbole eingesetzt werden.

2. Vektorielle Darstellung von Wechselstromgrößen. Das skalare Produkt eines Vektors  $u$  mit dem Einheitsvektor  $\xi$  der  $x$ -Achse stellt den Augenblickswert einer Spannung dar. Es gilt

$$u \xi = u_1 \cos \omega t = u. \quad (8)$$

Die Einführung des Operators „ $j$ “, der in der Vektorrechnung eine Drehung des Vektors um  $90^\circ$  ( $\pi/2$ ) entgegen dem Uhrzeigersinn bedeutet, erleichtert die vektorielle Darstellung der in der Wechselstromtechnik vorkommenden Differentialquotienten. Es ist z. B.

$$\frac{du}{dt} = \omega u_1 \cos\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right) = \frac{d}{dt}(u \xi) = \xi \frac{du}{dt}. \quad (9)$$

Wird auf Gleichung (8) der Operator „ $j$ “ angewandt, so folgt

$$\xi j u = u_1 \cos\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right), \quad (10)$$

multipliziert mit  $\omega$

$$\xi j \omega u = u_1 \omega \cos\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right), \quad (11)$$

d. h. es ist in Verbindung mit (9)

$$\frac{du}{dt} = j \omega u, \quad \frac{d^n u}{dt^n} = (j \omega)^n u. \quad (12)$$

Für den Kondensator gilt  $Q = C \cdot U$  oder

$$\frac{dQ}{dt} = i = C \frac{du}{dt}; \quad (13)$$

das ergibt in der symbolischen Darstellung  $i = j \omega C u$ ; die Gleichung entspricht dem Ohmschen Gesetz,  $\frac{1}{j \omega C}$  heißt „Widerstandsoperator“.

Aus Gleichung (7) folgt die Gleichgewichtsbedingung für die Wechselstrombrücke

$$\Re_1 \Re_3 = \Re_2 \Re_4$$

oder in komplexen Symbolen

$$r_1 r_3 e^{j(\varphi_1 + \varphi_3)} = r_2 r_4 e^{j(\varphi_2 + \varphi_4)}.$$

Die Gleichungen zwischen komplexen Symbolen werden in die zwei ihr gleichwertigen reellen Bedingungen zerlegt; daraus ergeben sich die zwei Bedingungen

$$r_1 r_3 = r_2 r_4 \tag{14}$$

$$\varphi_1 + \varphi_3 = \varphi_2 + \varphi_4, \tag{15}$$

die für die Wechselstrombrücken von ausschlaggebender Bedeutung sind.

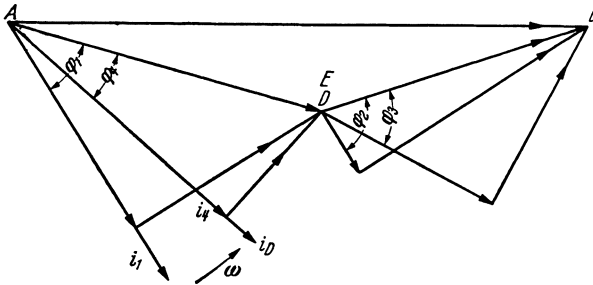


Abb. 61. Vektordiagramm einer Wechselstrombrücke.

Auf S. 95 war bereits bei der Erklärung des Verlustfaktors eines Kondensators von der vektoriellen Darstellung der Wechselstromgrößen Gebrauch gemacht worden. Ein ähnlich anschauliches Bild erhält man, wenn man diese Darstellung auf die Brückenschaltung nach Abb. 60 anwendet. Die Aufgabe besteht darin, bei gegebenen komplexen Widerständen  $\Re_1$  bis  $\Re_4$  das Diagramm der abgeglichenen Brücke zu zeichnen, d. h.  $i_5 = 0$ <sup>1</sup>. Für die Konstruktion geht man zweckmäßig aus von einem gegebenen Stromvektor  $i_1$  (s. Abb. 61); Lage und Größe des zugehörigen Spannungsvektors im Brückenzweig 1 läßt sich rechnerisch und graphisch wie auf S. 102 gezeigt gewinnen. Dadurch ist die Lage des Spannungsvektors  $AE$  gegeben. Dieser stimmt nach Lage und Größe voraussetzungsgemäß bei abgeglichener Brücke mit dem Spannungsvektor  $AD$  überein; damit ist auch die Lage des Stromvektors  $i_4$  bestimmt. Mit den Strömen  $i_1$  oder  $i_4$  kann in der gleichen Weise ausgehend vom Punkt  $ED$  der Spannungsvektor  $EB = DB$  konstruiert und die Lage des Vektors der Brückenspannung  $AB$  gefunden werden. Aus der Abb. 61 ergeben sich nach den Grundgesetzen der Geometrie die Gleichgewichtsbedingungen der abgeglichenen Brücke Gleichung (14) und (15).

<sup>1</sup> Siehe auch J. CONSTANTINESCO: Über graphische Berechnung von Brückenschaltungen. Bull. Math. et Phys. Bucarest Bd. 7 (1935/36) S. 131.

3. Sterndreieckstransformation. Für die Berechnung erweiterter Brückenschaltungen ist die widerstandstreue Umbildung eines Leitungsdreieckes in einen Stern (Abb. 62) erwünscht. Es gilt, wenn  $\Delta_1, \Delta_2, \Delta_3$  die Widerstände der 3 Seiten eines Dreieckes,  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$  die Widerstände eines Sternes darstellen:

$$\sigma_1 = \frac{\Delta_2 \Delta_3}{\Delta_1 + \Delta_2 + \Delta_3},$$

$$\sigma_2 = \frac{\Delta_1 \Delta_3}{\Delta_1 + \Delta_2 + \Delta_3},$$

$$\sigma_3 = \frac{\Delta_1 \Delta_2}{\Delta_1 + \Delta_2 + \Delta_3}$$

und

$$\Delta_1 = \sigma_2 \sigma_3 \left( \frac{1}{\sigma_1} + \frac{1}{\sigma_2} + \frac{1}{\sigma_3} \right),$$

$$\Delta_2 = \sigma_1 \sigma_3 \left( \frac{1}{\sigma_1} + \frac{1}{\sigma_2} + \frac{1}{\sigma_3} \right),$$

$$\Delta_3 = \sigma_1 \sigma_2 \left( \frac{1}{\sigma_1} + \frac{1}{\sigma_2} + \frac{1}{\sigma_3} \right).$$

Die Umformung vereinfacht z. B. die Durchrechnung der erweiterten Schering-Brücke erheblich. Sie gilt jedoch nicht analog für die Ströme der verschiedenen Zweige.

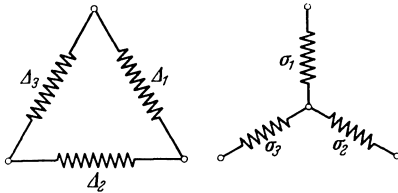


Abb. 62. Widerstandstreue Umformung einer Stern- in eine Dreieckschaltung und umgekehrt.

#### Hilfsmittel und Geräte für Wechselstrombrücken.

Soweit nicht für die Prüfung von Isolierstoffen die später angegebenen technischen Meßbrücken benutzt werden, sind die Meßbrücken im Laboratorium gemäß den Schaltanordnungen aus den Einzelgliedern zusammenzustellen.

Wenn ein solcher Aufbau richtige Meßwerte ergeben soll, müssen die Hilfsmittel und Geräte für die Wechselstrombrücken zweckmäßig ausgewählt werden.

1. Widerstände. Die Widerstände bestehen aus gealtertem Manganindraht<sup>1</sup>, auf Porzellan- oder andere Isolierrollen gewickelt. Sie sollen praktisch kapazitäts- und induktionsfrei sein, da andernfalls eine Phasenverschiebung  $\varphi$  zwischen Strom- und Spannung eintritt. Besitzt ein Widerstand  $r$  die Selbstinduktion  $L$  und die Kapazität  $C$ , so ist die Zeitkonstante des Widerstandes

$$t = \frac{L}{r} - r C.$$

Wechselstromwiderstände, die nach Angaben von WAGNER und WERTHEIMER<sup>2</sup> hergestellt sind, haben eine verschwindend kleine Zeitkonstante,

<sup>1</sup> SCHULZE, A.: Phys. Z. Bd. 39 (1938) S. 300.

<sup>2</sup> WAGNER u. WERTHEIMER: ETZ Bd. 34 (1913) S. 613 u. 649; ETZ Bd. 36 (1915) S. 606 u. 621.



die zwischen  $-1,2 \cdot 10^{-8}$  s und  $+4,5 \cdot 10^{-8}$  s liegt. Eine negative Zeitkonstante bedeutet, daß die Kapazität des Widerstandes über die Selbstinduktion überwiegt, was meist bei größeren Widerstandswerten der Fall ist. Kleine Widerstände besitzen im allgemeinen eine induktive Komponente. Die Widerstandswerte von Präzisionsgeräten zeigen Abweichungen vom Nennwert unter 0,1%. Festwiderstände, die als veränderliche Verhältniswiderstände in zwei Brückenzweigen gebraucht werden, werden nach SCHÖNE in einer Anordnung nach Abb. 63 geschaltet. Die Metallschienen *A*, *B* und *D* bilden Brückeneckpunkte; die 6 Widerstandsspulen liegen zwischen der Metallschiene *D* und den 6 Kontaktblöcken. Diese sind durch Brückenstößel sowohl mit der Schiene *A* als auch mit *B* zu verbinden. Der Vorteil der Anordnung besteht darin, daß mit nur 2 Stößeln jedes Brückenverhältnis eingestellt werden kann; bei gleichem Brückenverhältnis können ferner die Widerstandsspulen in den 2 Brückenzweigen leicht dadurch vertauscht werden, daß die Meßbrückenstößel jeweils auf die andere Seite des Kontaktblockes gesteckt werden.

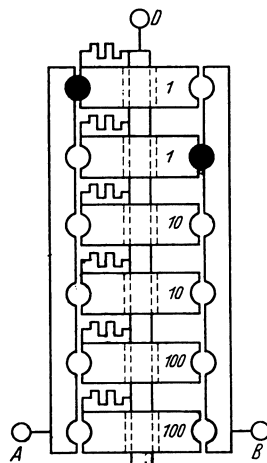


Abb. 63.  
Anordnung von Verhältniswiderständen nach SCHÖNE für Brückenmessungen.

Regelbare Widerstände werden als Dekadenkurbelwiderstände ausgeführt. 10 oder 12 gleiche Einheiten durch eine Kurbel nach Abb. 64

schaltbar bilden eine Dekade. Die Kurbelwiderstände haben die unbequemen Stößelwiderstände nahezu völlig verdrängt. Der Aufwand von 10 gleichen Spulen kann vermieden werden durch Wahl von nur 4 verschiedenen Widerstandsspulen, die

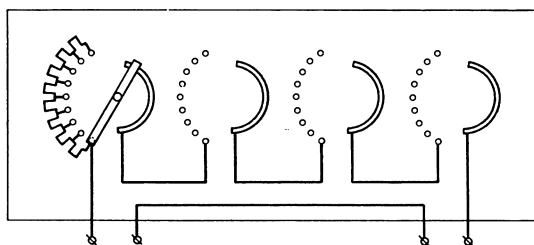


Abb. 64. Schaltschema eines Dekadenkurbelwiderstandes nach WOLFF.

ähnlich wie beim Stößelwiderstand auch in einer Kurbelschaltung einen Dekadenwiderstand ergeben<sup>1</sup>. Durch sorgfältige Ausführung der Gleitkontakte, Einölen mit Petroleum, sind die Übergangswiderstände klein zu halten. Die Meßdaten an einem handelsüblichen Fünf-Dekadenkurbelwiderstand bei 20° sind in der Tabelle 11 wiedergegeben.

<sup>1</sup> Dictionary of Applied Physics, Bd. 2, S. 693.

Tabelle 11<sup>1</sup>.

$\Omega$	gemessen	$\Omega$	gemessen	$\Omega$	gemessen	$\Omega$	gemessen	$\Omega$	gemessen
1000	1000,2	100	100,14	10	10,000	1	1,0002	0,1	0,10002
2000	2000,4	200	200,32	20	19,999	2	2,0003	0,2	0,20003
3000	3000,6	300	300,47	30	29,998	3	3,0004	0,3	0,30003
4000	4000,8	400	400,46	40	39,997	4	4,0006	0,4	0,40003
5000	5000,9	500	500,45	50	49,997	5	5,0006	0,5	0,50004
6000	6001,1	600	600,44	60	59,996	6	6,0007	0,6	0,60004
7000	7001,3	700	700,43	70	69,996	7	7,0010	0,7	0,70006
8000	8001,5	800	800,42	80	79,996	8	8,0011	0,8	0,80007
9000	9001,7	900	900,41	90	89,996	9	9,0016	0,9	0,90007
10000	10002	1000	1000,4	100	100,00	10	10,002	1,0	1,0001
11000	11002	1100	1100,4	110	110,00	11	11,002	1,1	1,1001
12000	12002	1200	1200,4	120	120,00	12	12,002	1,2	1,2001

Widerstände unter  $0,1 \Omega$  werden als bifilare Schleifdrahtwiderstände ausgeführt. Der Schleifkontakt erfordert besondere Pflege. Wenn es die Schaltung erlaubt, soll der Schleifkontakt als stromführender Kontakt benutzt werden.



Abb. 65. Regelbarer Widerstand mit konstanter Induktivität.

Kleine veränderliche Widerstände mit einer sehr geringen und konstanten Selbstinduktion werden wie folgt hergestellt: Zwei Streifen aus Kupfer, an einem Ende miteinander verbunden, und ein Streifen aus Widerstandsband, durch Glimmerstreifen gegeneinander isoliert, werden zusammengepreßt. Eine verschiebbare Klammer *K* gestattet die Veränderung des Widerstandsbetrages ohne Änderung der Selbstinduktion (Abb. 65).

2. Kondensatoren<sup>2</sup>. In den Brückenschaltungen wird die Kapazität des Prüflings mit einem Normalkondensator verglichen oder der Prüfling durch einen Kondensator mit bekannter Kapazität ersetzt (Substitutionsverfahren). Für Meßzwecke werden verlustfreie Präzisionskondensatoren mit Kapazitäten von Bruchteilen eines pF bis zu mehreren 1000 pF mit Luft als Dielektrikum, als Kondensatoren mit festem Dielektrikum bis zu mehreren  $\mu\text{F}$  benutzt. Die Spannungen, denen die Kondensatoren ausgesetzt sind, schwanken von einigen V bis zu vielen kV bei Hochspannungsbrückenmessungen. Diesen Beanspruchungen können jeweils nur besondere Bauarten genügen.

Die Kapazität eines Kondensators ist dann definiert, wenn alle Kraftlinien zwischen den Elektroden verlaufen. Meist ist dies nicht der

<sup>1</sup> Der Nullwert dieses Dekadenkurbelwiderstandes beträgt  $0,0048 \Omega$ ; dieser Wert ist noch zu addieren.

<sup>2</sup> ZICKNER, G.: Über Kondensatoren und ihre Eichung. Leipzig: Hachmeister u. Thal 1928. — COURSEY, P. R.: Electrical Condensers London 1927.

Fall, sondern es endet auch ein kleiner Teil von Kraftlinien auf Körpern, die sich in der Umgebung des Kondensators befinden. Die Kapazität ist dadurch abhängig von der Umgebung. Um sie zu „definieren“, werden die Elektrodenplatten mit einem Metallgehäuse versehen. Die Elektroden 1 und 2 besitzen gegeneinander die „Teilkapazität“  $k_{12}$ , sowie jede Elektrode ferner eine „Teilkapazität“  $k_{10}$  bzw.  $k_{20}$  gegen das Gehäuse 0.

Bei großen Elektrodenflächen in geringem Abstand voneinander sind die Teilkapazitäten gegen Erde oft zu vernachlässigen, und man bezeichnet  $k_{12}$  als die Kapazität des Kondensators schlechthin. Andernfalls wird die „Betriebskapazität“ des Kondensators je nach der Schaltung um eine Teilkapazität vergrößert. Meist ist eine Elektrode mit der Hülle verbunden. Die Betriebskapazität ist dann

$$K_I = k_{12} + k_{10} \quad \text{bzw.} \quad K_{II} = k_{12} + k_{20}$$

oder wenn beide Belegungen von dem Metallgehäuse isoliert sind, so hängt die resultierende Kapazität von der Schaltung ab. Sie kann z. B. sein

$$K_{III} = k_{12} + \frac{k_{10} k_{20}}{k_{10} + k_{20}}.$$

a) *Normalkondensatoren für Niederspannung*<sup>1</sup> sind meist Plattenkondensatoren in Metallgehäuse. Die zwei Systeme 1 und 2 sind nach den Modellen der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt unter Zwischenlage von hochwertigen Isolierstoffen, z. B. Quarz, an dem Metallgehäuse montiert; zwischen den Elektroden 1 und 2 befinden sich nur wenige Quarzisolatoren. Ein dielektrischer Verlustfaktor kann an derartigen Kondensatoren nicht festgestellt werden. Er ist sicher kleiner als  $1 \cdot 10^{-4}$ . Diese Kondensatoren können durch einfaches Übereinandersetzen parallel geschaltet werden. Über die Bauart von Präzisionsmeßkondensatoren und ihre Unveränderlichkeit in Abhängigkeit von der Alterung und Temperatur s. u. a. THOMAS<sup>2</sup>.

b) *Kondensatoren mit stetig veränderlicher Kapazität*<sup>1</sup>. Meßkondensatoren mit stetig veränderlicher Kapazität kommen im allgemeinen nur für niedere Betriebsspannung bis etwa 3000 V in Frage. Auch hier ist nach der Bauart der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt zwischen den Elektroden 1 und 2 als Dielektrikum nur praktisch verlustfreier Quarz und Luft wirksam. Sie werden im allgemeinen als Kreisplattenkondensatoren ausgeführt. In ein feststehendes System paralleler Platten

<sup>1</sup> GLEBE, E. u. G. ZICKNER: Z. Instrumentenkde. Bd. 53 (1933) S. 1 u. 49.

<sup>2</sup> THOMAS, H. A.: J. Instn. electr. Engrs. Bd. 79 (1936) S. 297; ferner Untersuchungen an Kondensatoren bei Hochfrequenz s. R. F. FIELD u. D. B. SINCLAIR: Proc. Inst. Radio Engrs. Febr. 1935 u. D. B. SINCLAIR: Gen. Radio Exper. Bd. 12 (1938) Nr. 11, S. 7. Kondensatoren besitzen im allgemeinen eine Selbstinduktion, die die wirksame Kapazität bei Hochfrequenz nach der Gleichung  $\frac{1}{C_e} = \frac{1}{C} - \omega^2 L$  vergrößert. Die Werte für die Selbstinduktion liegen bei etwa  $0,05 \mu\text{H}$ . Ferner ASTIN, A. V.: J. Res. Nat. Bur. Stand. Bd. 21 (1938) 4, S. 425, Messung von Verlustfaktoren auf  $\pm 5 \cdot 10^{-7}$  genau.

Tabelle 12. Drehkondensatoren

Sp.	1	2	3	4
Nr.	Plattenbezeichnung	Charakteristik	Kennlinie	Steigungsfaktor absolut
1	Kreisplatten	$\frac{dC}{d\varphi} = \text{const}$	$C = C_0 + \text{const} \cdot \varphi$	$\frac{C_\pi - C_0}{\pi}$
2	Nierenplatten	$\frac{d\lambda}{d\varphi} = \text{const}$	$\lambda = \lambda_0 + \text{const} \cdot \varphi$	$2\pi v \sqrt{L} \frac{\sqrt{C_\pi} - \sqrt{C_0}}{\pi}$
3	Sichelplatten	$\frac{df}{d\varphi} = \text{const}$	$f = f_0 - \text{const} \cdot \varphi$	$\frac{1}{2\pi \sqrt{L} C_0} - \frac{1}{2\pi \sqrt{L} C_\pi}$ $\pi$
4	Dekremeterplatten	$\frac{dC}{d\varphi} = C \cdot \text{const}$	$C = C_0 e^{\text{const} \varphi}$	$\frac{\ln C_\pi - \ln C_0}{\pi}$
		$\frac{d\lambda}{d\varphi} = \lambda \cdot \text{const}$	$\lambda = \lambda_0 e^{\text{const} \varphi}$	$\frac{\ln \sqrt{C_\pi} - \ln \sqrt{C_0}}{\pi}$
		$\frac{df}{d\varphi} = f \cdot \text{const}$	$f = f_0 e^{-\text{const} \varphi}$	

(Stator) wird ein drehbares Plattensystem (Rotor) eingeführt. Die Einstellung geschieht durch Feintrieb, die Ablesung mittels Nonius. Bei ähnlichen Konstruktionen in Amerika erfolgt die Ablesung an einer Mikrometerschraube. Für einen Kreisplattendrehkondensator gilt, daß bei Drehungen um gleiche Winkelgrößen  $d\varphi$  die Kapazität stets um gleiche Beträge  $dC$  wächst; es ist demnach  $dC/d\varphi = \text{const} = a$ . Die Integration ergibt, daß die Kapazität  $C$  linear vom Einstellwinkel  $\varphi$  abhängt. Die Eichkurve eines solchen Kondensators ist eine gerade Linie. Da eine Anfangskapazität  $C_0$  vorhanden ist, die von den Plattenrändern sowie von den Metallteilen des Gehäuses herrührt, so ergibt sich für  $C = C_0 + a\varphi$ . Die Konstante  $a$  bedeutet den Steigungsfaktor des Kondensators, d. h. die Kapazitätsänderung des Kondensators je Skalengrad. In Wirklichkeit treten am Anfang und Ende einer Eichkurve eines Drehkondensators Abweichungen von der Linearität auf. Trägt man die Abweichungen von dem linearen Verlauf der Eichgerade graphisch auf, so erhält man eine stark gekrümmte, die sog. Fehlerkurve des Kondensators. Die Abweichungen der Eichkurve von einer Geraden am Anfang und Ende der Skala sind durch die starken Änderungen des Feldverlaufes an diesen Teilen bedingt. Die unliebsame Krümmung der Kapazitätskurve am Anfang und Ende hat man dadurch vermieden, daß beim Skalennullpunkt die Platten der zwei Systeme bereits etwas ineinandergreifen.

mit verschiedenem Änderungsgesetz.

5	6	7	8
Kapazität $C$	Analytischer Ausdruck der Randkurve $r$	Kurvenform	Kurvenname
$C_0 + (C_\pi - C_0) \frac{\varphi}{\pi}$	$R$	$r = \text{const}$	Kreis
* $C_0 + (C_\pi - C_0) \left(\frac{\varphi}{\pi}\right)^2$	$\sqrt{(R^2 - \varrho^2) \frac{\varphi}{\pi} + \varrho^2}$	$r^2 = \varphi \text{ const}$	Parabolische Spirale
$\frac{C_\pi}{\left[\sqrt{\frac{C_\pi}{C_0}} - \left(\sqrt{\frac{C_\pi}{C_0}} - 1\right) \frac{\varphi}{\pi}\right]^2}$	$\sqrt{\frac{R^2 - \varrho^2}{\left[\sqrt{\frac{C_\pi}{C_0}} - \left(\sqrt{\frac{C_\pi}{C_0}} - 1\right) \frac{\varphi}{\pi}\right]^3 + \varrho^2}}$	$r^2 \varphi^3 = \text{const}$	Hyperbolische Spirale höherer Ordnung
$C_0 e^{\frac{\varphi}{\pi} \ln \frac{C_\pi}{C_0}}$	$\sqrt{(R^2 - \varrho^2) e^{\ln \frac{C_\pi}{C_0} \left(\frac{\varphi}{\pi} - 1\right)} + \varrho^2}$	$r = \text{const } e^{\frac{\varphi}{\pi}}$	Logarithm. Spirale

\* Gilt nur angenähert für kleines  $C_0$ .

Für statische Messungen finden auch Kondensatoren mit zylindrischer Anordnung der Elektroden Verwendung. So hat GERDIEN einen Zylinderkondensator mit axial verschiebbaren Röhren angegeben, dessen Kapazität zwischen 20 und 500 pF regelbar ist. Andere Kondensatoren mit Bernsteinisolation sind z. B. die von HARMS (20—500 pF) und WULF (25—50 pF).

Als technische Kondensatoren kommen außer den Kreisplatten-Präzisionsmeß-Kondensatoren auch noch andere in Frage, deren Kurvenform durch einen bestimmten analytischen Ausdruck gegeben ist, und deren Kapazitätsänderung nicht mehr linear von der Winkeländerung  $\varphi$  abhängt. Solche Plattenkondensatoren sind unter dem Namen Nierenplatten-, Sichelplattenkondensatoren u. ä. bekannt. Eine Übersicht über die Änderungsgesetze der bekanntesten Kondensatoren gibt die Tabelle 12<sup>1</sup>.

Die Kapazitäten von Isolierstoffprüflingen liegen oft im Bereich von einigen pF. Als Vergleichskapazitäten dienen in diesem Falle Spezialdrehkondensatoren nach ZICKNER<sup>2</sup>, die ohne Anfangskapazität die Einstellung von Kapazitäten von 0 bis 20 pF gestatten. Die beiden Plattensysteme sind bei dieser Ausführung vom Gehäuse isoliert und können

<sup>1</sup> ZICKNER, G.: Über Kondensatoren und ihre Eichung. Leipzig 1928.<sup>2</sup> ZICKNER, G.: Elektr. Nachr.-Tech. Bd. 7 (1930) S. 443.

voneinander statisch abgeschlossen werden, so daß sie gegeneinander keine Kapazität besitzen. Neuerdings werden nach dem gleichen Prinzip Kondensatoren hergestellt, deren Kapazität zwischen 0,2 und 500 pF stetig regelbar ist.

c) *Hochspannungskondensatoren.* Für Hochspannungskondensatoren wählt man die Form des Zylinders als äußere Spannungsbelegung 1, einen konzentrischen Zylinder mit kleinerem Durchmesser als Elektrode 2, der durch 2 Schutzspalte nach Abb. 29, S. 66 unterteilt ist. Beide Systeme sind gegen Erde isoliert. In der am meisten benutzten Hochspannungs-Brückenschaltung nach SCHERING wird nur die Teilkapazität  $k_{12}$  als Vergleichskapazität benutzt.

Das Isolierstoffstück zwischen dem Meßzylinder und den 2 Schutzzyklindern besteht aus paraffiniertem Holz oder Hartgummi. Der Isolierstoff, der Meßzylinder und Schutzzyklinder verbindet, wird etwas ausgekehlt; dadurch wird der Kriechweg vergrößert und einer Verstaubung des schmalen Schutzringes bei waagerechter Lage des Kondensators vorgebeugt. Eine Kontrolle, daß sich im Zylinderkondensator sowie zwischen dem Meß- und den Schutzzyklindern kein Staub befindet, ist von Zeit zu Zeit nötig, da nur dann die Kapazität  $k_{12}$  verlustfrei ist. Die Höhe der Spannung, bis zu der der Zylinderkondensator brauchbar ist, hängt ab von dem Abstand der Zylinder, d. h. der Überschlagsspannung zwischen beiden Zylindern und somit auch von der Form der Zylinderenden. Im allgemeinen will man den Kondensator bis dicht an die Grenze seiner Überschlagsspannung verwenden. Man vermeidet daher alle scharfen Ecken und Kanten. ROGOWSKI<sup>1</sup> hat für die Ausbildung des Randes analytische Kurven ermittelt unter der Voraussetzung, daß die größte Feldstärke im homogenen Felde zwischen 2 Platten auftritt. Diese analytische Berechnung der Kurvenform hat W. SCHILLING<sup>2</sup> erweitert, indem er für die Berechnung der Krümmungskonstanten die Entladebedingung von TOWNSEND oder für den speziellen Fall von Luft die Entladebedingung von W. O. SCHUMANN einführte. Auf diese Weise kann durch Rechnung die praktisch günstigste Form der Abrundung ausgewählt werden. In der Mehrzahl der Fälle wird eine aus allgemeinen Grundsätzen der Hochspannungstechnik bekannte Abrundung genügen. Bei sehr genauen Messungen ist nicht nur die Feldverteilung zwischen den beiden Zylindern wichtig. Auch zwischen Meßzylinder und Schutzzyklinder können scharfe, hervorstehende Kanten ähnlich wie Schmutzfasern Anlaß zu Störungen geben. Die horizontale Anordnung des Zylinderkondensators ist der vertikalen Aufstellung<sup>3</sup>

<sup>1</sup> ROGOWSKI, W. u. H. RENGIER: Arch. Elektrotechn. Bd. 16 (1926) S. 73.

<sup>2</sup> SCHILLING, W.: Arch. Elektrotechn. Bd. 24 (1930) S. 383.

<sup>3</sup> Vgl. z. B. LEE, E. S., B. G. CHURCHER and C. DANNATT: World Pwr. Bd. 5 (1926) S. 238.

vorzuziehen. J. B. WHITEHEAD und T. ISSHIKI<sup>1</sup> haben Konstruktionen vorgeschlagen, bei denen sich der hochspannungsführende Zylinder im Inneren befindet, während der Meßbelag mit den Schutzringen den äußeren Zylinder bildet. Sie bieten keinen Vorteil gegenüber denjenigen mit äußerem Hochspannungszylinder.

Auch Zwei- und Dreiplatten-Hochspannungskondensatoren sind ausgeführt worden. Der Dreiplattenkondensator gibt dabei gegen einen geringen Mehrpreis eine Verdopplung des Betrages der Kapazität, einen Vorteil, der heute nicht mehr in die Waagschale fällt, da bei den hohen Spannungen ein Meßkondensator mit 50 pF ausreichend ist.

Als Werkstoff für die Elektroden wird im allgemeinen Messing oder Zinkblech je nach der Größe des Kondensators in verschiedener Stärke verwendet. Das bedingt bei den großen Abmessungen der Kondensatoren, daß die Geräte schwer sind. Es sind deshalb auch für ortsveränderliche Kondensatoren mit Zink bespritzte Hartpapierzylinder benutzt worden. Die Zinkschicht soll so dicht und festhaftend sein, daß durch Polieren eine glatte Oberfläche hergestellt werden kann.

*d) Hochspannungspreßgaskondensatoren.* Der Spannungsbereich des Hochspannungsluftkondensators geht, wenn seine Abmessungen sich in einem gewissen laboratoriumsmäßigen Rahmen halten sollen, bis etwa 120 kV. Darüber hinaus sind Preßgaskondensatoren zu verwenden<sup>2</sup>. Die Durchschlagsspannung von Gasen steigt bis zu 10 atü ungefähr linear mit dem Druck an. Der Betriebsdruck beträgt daher etwa 10 bis 12 atü. Die Druckluftkondensatoren werden mit dem Hochspannungszylinder im Innern als Zylinderschutzringkondensatoren hergestellt<sup>3</sup>. Einen wesentlichen Fortschritt bedeutet der von SCHERING und VIEWEG<sup>4</sup> angegebene Hochspannungskondensator mit einem Gehäuse aus Hartpapierrohr. Die Anordnung der Elektroden zeigt Abb. 66; Hersteller Hartmann & Braun, Frankfurt/Main.

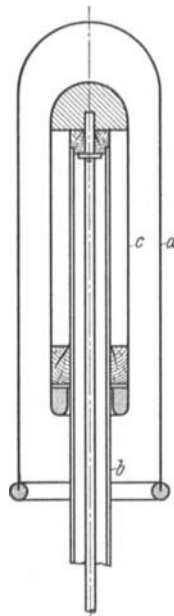


Abb. 66. Anordnung der Elektroden in einem Hochspannungs-Preßgaskondensator  
*a* Hochspannungselektrode; *b* Abschirmung; *c* Meßelektrode.

<sup>1</sup> WHITEHEAD, I. B. u. T. ISSHIKI: Trans. Amer. Inst. electr. Engrs. Bd. 39 (1920) S. 1057.

<sup>2</sup> Gase unter erhöhtem Druck sind dielektrisch verlustfrei, sofern sie trocken sind. Ein Taupunktthygrometer für die Ermittlung der Feuchtigkeit von komprimierten Gasen ist von A. K. FRANK entwickelt worden [Gen. Electr. Rev. Bd. 41 (1938) S. 435].

<sup>3</sup> ATKINSON, R. W.: Electr. J. Bd. 22 (1925) S. 58 (Cambridge Instrument Co.) (Hartmann & Braun).

<sup>4</sup> SCHERING, H. u. R. VIEWEG: Z. techn. Phys. Bd. 9 (1928) S. 442.

Die Kapazität ist nur in sehr geringem Maße von dem Druck abhängig. Abb. 67 zeigt die Abhängigkeit vom Druck in dem Bereich von 1 bis 10 atü für Preßluft und Kohlendäurefüllung. Die Dichtung der Geräte ist durch Verwendung von polymerisierenden Kunststoffen einwandfrei<sup>1</sup>.

e) *Kondensatoren mit festem Dielektrikum.* Für Meßzwecke kommen bis jetzt nur Glimmer-Kondensatoren in Frage. Glimmer-Platten von 0,1 mm Dicke haben eine elektrische Festigkeit von  $1,2 \cdot 10^6$  V/cm. Die Dielektrizitätskonstante liegt zwischen 4 und 8. Glimmer-Kondensatoren werden entweder einzeln oder in mehreren Einheiten zwischen Hartgummiplatten in einem mit Metall ausgekleideten Kasten zu Kapazitätssätzen eingebaut. Ein Satz enthält im allgemeinen Kapazitäten

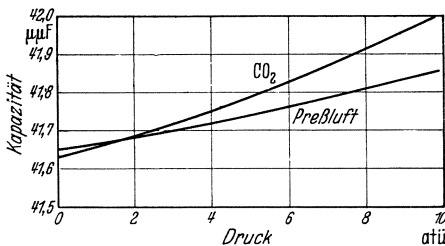


Abb. 67. Abhängigkeit der Kapazität eines Gas-kondensators vom Gasdruck.

von 0,001 bis  $1 \mu\text{F}$ , neuerdings auch von  $1 \mu\text{F}$  bis  $10 \mu\text{F}$ . Sie werden meist als Dreidekaden-kurbelkondensatoren benutzt. Ein Überschneiden der Dekaden untereinander ist für das Arbeiten angenehm. Dementsprechend werden Kondensatoren mit den Stufen  $12 \times 0,001$ ;  $12 \times 0,01$ ;  $12 \times 0,1 \mu\text{F}$  hergestellt. Die Prüfspannung ist 1000 V, die Betriebs-

spannung 500 V Wechselspannung. Bei der Schaltung 0 hat der Kondensator die Kapazität der Schaltanordnung; sie ist bei Stöpselkondensatoren etwa 30 pF, bei Kurbelkondensatoren 30 bis 60 pF. Die Kapazitätswerte sollen in der Dekade 0,1 bis  $1 \mu\text{F}$  auf 0,1%, in der Dekade 0,01 bis  $0,1 \mu\text{F}$  auf 0,3% und in der Dekade 0,001 bis  $0,01 \mu\text{F}$  auf 0,1% abgeglichen sein. Die Kapazität der Geräte verringert sich mit wachsender Frequenz, und zwar bei guten Kondensatoren um etwa 1% bei einer Frequenzänderung von 50 auf 2000 Hz. Die Änderung kann bis zu 4% betragen. Die Abnahme wird bei Hochfrequenz sehr klein. CURTIS<sup>2</sup> bezeichnet den Grenzwert, dem sich die Kapazität bei der Frequenz unendlich nähert, als die geometrische Kapazität. Der Temperaturkoeffizient der Kapazität ist im allgemeinen negativ, und zwar  $0,1\%_{00}$  je °C. Der Verlustfaktor eines guten Kondensators beträgt bei normaler Temperatur und 800 Hz etwa  $1 \cdot 10^{-4}$ . Er wächst mit steigender Temperatur und abnehmender Frequenz<sup>3</sup>.

<sup>1</sup> BÖLSTERLI, A. A.: Bull. schweiz. elektrotechn. Ver. Bd. 22 (1931) S. 245.

<sup>2</sup> CURTIS, H. L.: Bull. Bur. Stand. Bd. 6 (1910) S. 431.

<sup>3</sup> Über die Eichung von Kondensatoren siehe G. ZICKNER, zit. S. 106; ferner L. H. FORD u. N. F. ASTBURY: J. sci. Instrum. Bd. 15 (1938) S. 122. — Messungen an Kondensatoren bei Hochfrequenz u. a. E. DARMSTAEDTER: Arch. Elektrotechn. Bd. 24 (1930) S. 701. — M. BOELLA: Proc. Inst. Radio Engrs. Bd. 26 (1938) S. 421. — Über das Verhalten von Kondensatoren, Spulen und Widerständen bei sehr hohen Frequenzen bis 100 MHz s. W. H. WARD: J. sci. Instrum. Bd. 14 (1937) S. 132.



3. Nullinstrumente. Die Brücken benötigen als Detektor in dem Brückenzeige  $AB$  ein empfindliches Nullinstrument. Die üblichen Meßinstrumente sind Telephon und Vibrationsgalvanometer. Bei Frequenzen über 700 Hz und höher ist das Telephon geeignet. Die Empfindlichkeit des Telephons ist nicht im ganzen Frequenzbereich konstant, da die Membran Eigenfrequenzen besitzt. Die Kurve der Empfindlichkeit zeigt daher infolge Resonanz in Abhängigkeit von der Frequenz scharfe Spitzen. M. WIEN fand an einem Bell-Kopfhörer Eigenfrequenzen bei 1100, 2800 und 6500 Hz, an einem Siemens-Kopfhörer bei 750, 2350 und 5400 Hz. Im allgemeinen besitzen die üblichen Telephon-Kopfhörer ein Maximum der Stromempfindlichkeit zwischen 700 und 1200 Hz. Einige Konstruktionsänderungen zur Erhöhung seiner Empfindlichkeit sind von K. W. WAGNER beschrieben worden.

Kopfhörer erfordern eine verhältnismäßig ruhige Umgebung und ihre Verwendung ist auf einen bestimmten Frequenzbereich beschränkt. Aus diesem Grunde hat man neuerdings die BRAUNSCHE Röhre als Nullgalvanometer ausgebildet. Die Brückenspannung wird verstärkt und einem Plattenpaar der BRAUNSCHE Röhre, z. B. der Horizontalablenkung zugeführt. Eine sinusförmige Zeitspannung, die von der anderen Brückendiagonale entnommen wird, liegt an einem zweiten, zum ersten senkrechten Plattenpaar. Wenn die Brücke vollkommen abgeglichen ist, ist keine horizontale Ablenkspannung vorhanden und auf dem Leuchtschirm erscheint eine senkrechte Linie. Im unabgeglichenen Zustand erscheint auf dem Leuchtschirm eine Ellipse. Durch Veränderung der Phasenbeziehung zwischen der Zeitablenkspannung und der Ablenkspannung im Nullzweig der Brücke kann die Phasenlage der Zeitablenkspannung hinsichtlich der zu untersuchenden Brückenspannung überwacht werden. Wenn die richtige Phasenlage zwischen beiden Spannungen eingestellt ist, wird ein Abgleich der Brücke durch Kapazität oder Induktivität nur die Lage der Ellipse verdrehen, ohne ihren Flächeninhalt zu vergrößern oder zu verkleinern, und eine Veränderung des OHMSCHEN Teiles wird nur die Fläche der Ellipse vergrößern, ohne ihre Lage zu verdrehen. Wird jedoch die Phase der Zeitablenkspannung um  $90^\circ$  gedreht, so tritt gerade das Umgekehrte ein, d. h. der Widerstandsabgleich der Brücke wird die Lage der Ellipse verdrehen, während der induktive oder kapazitive Abgleich den Flächeninhalt vergrößern oder verkleinern wird. Dadurch ist es möglich, die Brücke nach Phase und Größe der Nullspannung getrennt abzugleichen. In der Abb. 68 ist die Schaltanordnung eines Nulldetektors mit BRAUNSCHE Röhre gezeichnet, der auf die Arbeitsfrequenz der Brücke abgestimmt wird<sup>1</sup>. Die Empfindlichkeit des Gerätes wird mit  $100 \mu\text{V}$  bei 60 Hz angegeben.

<sup>1</sup> LAMSON, H. W.: Gen. Radio Exper. Bd. 13 (1939) Nr. 11 S. 5.

Das Vibrationsgalvanometer von SCHERING und SCHMIDT ist wegen seiner elektromagnetischen Abstimmung ein recht brauchbares Gerät für Messungen im Bereich von 16 bis 150 Hz. Seine Empfindlichkeit ist von RUMP<sup>1</sup> durch Konstruktionsänderung erhöht worden, wobei es gleichzeitig zu einem tragbarem Meßgerät mit elektrischer oder magnetischer Abstimmung ausgebildet wurde. Neuerdings sind handliche Verstärker<sup>2</sup> auf dem Markt (z. B. die Richtspannungsanzeiger der Firma Siemens & Halske), die die Empfindlichkeit der Brückeneinstellung erhöhen. Auch das magische Auge (s. S. 131) wird als Nullinstrument benutzt<sup>3</sup>.

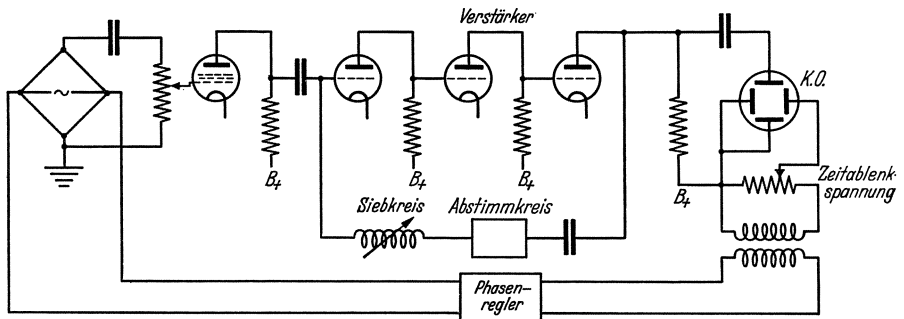


Abb. 68. Nulldetektor mit Braunscher Röhre.

4. Spannungsquellen. Bei 50 Hz sind übliche Transformatoren, bei höheren Frequenzen Laboratoriums-Meßsender für Niederspannung mit ausreichender Leistung handelsüblich zu haben (z. B. Siemens & Halske).

Wechselstrom-Brückenarrangierungen für die Messung des dielektrischen Verlustfaktors und der Kapazität.

**Schering-Brücke**<sup>4</sup>. Anwendungsbereich: Dielektrische Verlustfaktor-messungen, Kapazitätsmessungen an Isolierstoffen aller Art, vorwiegend bei 50 Hz bis zu den höchsten Spannungen. Die zur Zeit gebräuchlichste Brücke ist von SCHERING angegeben worden. Sie ermöglicht:

1. die Verluste bei sehr hohen Spannungen zu messen, da die Hochspannung führenden Brückenglieder während der Messung nicht geändert werden,

2. auch kleine Kapazitäten mit großer Genauigkeit zu bestimmen,

3. durch Wahl der Größe eines Brückenwiderstandes den Verlustfaktor direkt abzulesen.

<sup>1</sup> RUMP, W.: Physik. Z. Bd. 40 (1939) S. 493.

<sup>2</sup> THOMPSON, H. A.: Trans. Amer. Inst. electr. Engrs. Bd. 57 (1938) S. 379.

<sup>3</sup> ZICKNER, G. u. E. BLECHSCHMIDT: Tätigkeitsber. d. P.T.R. 1940.

<sup>4</sup> SEMM, A.: Arch. Elektrotechn. Bd. 9 (1920) S. 30. — SCHERING, H.: Arch. Elektrotechn. Bd. 17 (1926) S. 426 u. ETZ Bd. 52 (1931) S. 1133.

Die Anordnung<sup>1</sup> ist in der Abb. 69 gezeichnet.  $C_1$  ist der Prüfling,  $C_2$  ein Normkondensator,  $R_3$  und  $R_4$  kapazitäts- und induktionsfreie Widerstände,  $C_4$  ein Kurbelkondensator. Der Abgleich der Brücke erfolgt durch  $R_3$  und  $C_4$ . Für die abgegliche Scheringbrücke<sup>2</sup> gilt

$$C_1 = C_2 \frac{R_4}{R_3}, \quad \text{tg } \delta = R_4 \omega C_4.$$

Als Nullinstrument findet bei 50 Hz bis 500 Hz das Vibrationsgalvanometer<sup>3</sup>, von 500 Hz an das Telephon Verwendung.

**Einfluß der Erdkapazitäten und Schirmung.** Die Abschirmung der Brückenelemente durch Metallgehäuse hat die Aufgabe, statt der willkürlichen kapazitiven Beeinflussung der Brückenglieder untereinander definierte Teilkapazitäten zu schaffen und dabei die Kapazität vom Brückenelement zur Schutzhülle möglichst klein zu halten<sup>4</sup>. Die Abschirmungen werden mit bestimmten Brückenpunkten oder Erde verbunden. In der Scheringbrücke werden die Widerstände  $R_3$  und  $R_4$  sowie der Kondensator  $C_4$  und die Zuleitungen zum Galvanometer mit einer geerdeten Metallhülle umgeben.

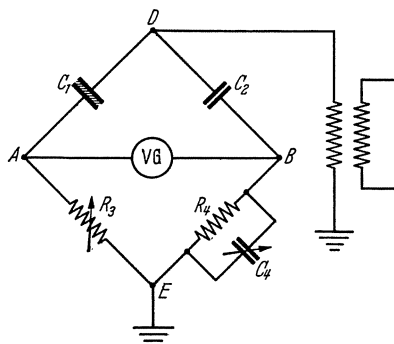


Abb. 69. Schering-Brücke.

Die Niederspannungselektroden der Kondensatoren  $C_1$  und  $C_2$  werden im allgemeinen von den Randwirkungen des elektrischen Hochspannungsfeldes und den dadurch bedingten Verlusten durch Anbringung von Schutzringen unabhängig gemacht. Diese Schutzringe werden während der Messung geerdet. Die Teilkapazitäten  $C_1^{10}$  und  $C_2^{10}$  liegen in der Brückenschaltung nach Abb. 69 gegen Erde und werden daher die Abgleichung und das Meßergebnis nicht beeinflussen. Die Teilkapazitäten  $C_1^{20}$  und

<sup>1</sup> ALTEN, F.: ETZ Bd. 57 (1936) S. 807 hat durch Übereinanderlagern der Vektoren für die Brückenteilwiderstände bei geeigneter Wahl der Maßstäbe sowie durch Parallelverschieben das Diagramm vereinfacht. Ein Leitstrahl, der sich um einen bestimmten Punkt dreht, gestattet, auf zwei Halbkreisen sowie auf drei Geraden alle durch größer oder kleiner werdende Verlustwinkel sich ergebende Änderungen der verschiedenen Einstellgrößen laufend in ihrer Abhängigkeit voneinander zu verfolgen.

<sup>2</sup> Für eine abgeschirmte Wechselstrombrücke vom Schering-Typ werden die genauen Gleichungen von I. C. BALSBAUGH u. A. HERZENBERG, J. Frankl. Inst. Bd. 218 (1934) S. 49, abgeleitet.

<sup>3</sup> Unter Umständen erhöht ein Transformator vor dem Vibrationsgalvanometer die Empfindlichkeit. Gantert Studienges. f. Höchstspannungsanlagen (1930) Heft 2.

<sup>4</sup> WALCHER, TH.: Arch. techn. Messen J 025—1 (Aug. 1936). Elektrostatische Abschirmung von Wechselstrom-Meßbrücken; sehr genaue Messungen s. N. F. ASTBURY: Phil. Mag. Bd. 26 (1938) S. 507.

$C_2^{20}$  legen sich jedoch parallel zu den Zweigen 3 und 4 und können unter Umständen Fehler verursachen. Wenn die Teilkapazität  $C_s$  vorhanden ist, ist der Verlustfaktor  $\operatorname{tg} \delta = \omega R_4 (C_4 + C_s)$ . Die Teilkapazitäten  $C_1^{20}$  und  $C_2^{20}$  werden durch die Abschirmungen, die notwendigerweise die Anschlußleitungen der Kapazitäten erfahren müssen, nicht unwesentlich vergrößert. Das trifft besonders dann zu, wenn aus hochspannungstechnischen Gründen die Kondensatoren von der Brücke weit entfernt aufgestellt werden müssen. Der Anschluß erfolgt über biegsame kapazitätsarme Kabel mit großem Durchmesser (Hersteller u. a. Kabelwerk Vacha) oder durch das sog. Fadenkabel (Hersteller Norddeutsche Kabelwerke AG, Berlin. Hier ist der Leiter durch eine sinnreiche Fadenkonstruktion konzentrisch im Innern von zwei gleich- und einer gegenläufigen Metallspirale aufgehängt). Für genaue Messungen kann der durch die Teilkapazitäten bedingte Fehler durch einen Hilfszweig vermieden werden (s. S. 119).

**Erweiterte Schering-Brücke.** Anwendungsgebiet: Dielektrische Verlustfaktormessungen an großen Kabellängen, Kapazitätsmessungen sehr großer Kondensatoren.

Sofern der Ladestrom des Kondensatorprüflings 30 mA überschreitet, ist der Widerstand  $R_3$  vor Überlastung durch einen Nebenschluß  $R_N$  zu schützen und die erweiterte Brückenschaltung anzuwenden (Abb. 70). Für die abgeglichene Brücke gilt

$$C_1 = C_2 R_4 \frac{r + R_3 + \sigma + R_N}{R_N(R_3 + \sigma)},$$

$$\operatorname{tg} \delta_1 = \omega C_4 R_4 - \omega C_2 R_4 \left[ \frac{r + s - \sigma}{R_3 + \sigma} \right].$$

Große Kapazitäten treten bei der Stoffprüfung nicht auf. Selbst sehr dünne Isolierstoff-Filme haben nach Belegung mit Elektroden im allgemeinen immer noch Kapazitätswerte, die sich mit einem einfachen Brückenverfahren untersuchen lassen. Sehr große Kapazitäten erfordern wegen der hohen Ladeströme und der induktiven Beeinflussung der Brückenarme besondere Maßnahmen<sup>1</sup>.

Wie man die Brückenschaltung mit Hilfe eines statischen Voltmeters und eines Hilfskondensators gleichzeitig für die Messung der hohen Brückenspannung mittels kapazitiver Spannungsteilung erweitern kann, hat H. JENSS<sup>2</sup> gezeigt. Brücke mit Erdung des Punktes A s. BORMANN und SEILER<sup>3</sup>.

<sup>1</sup> ZICKNER, G. u. G. PFESTORF: Z. techn. Phys. Bd. 12 (1931) S. 210. — ZICKNER: Z. Instrumentenkde Bd. 50 (1930) S. 298 u. Bd. 52 (1932) S. 170. — BAUDER u. JANSSEN: E. u. M. Bd. 50 (1932) S. 581. — ZICKNER u. PFESTORF: ETZ Bd. 51 (1930) S. 1681.

<sup>2</sup> JENSS, H.: ETZ Bd. 52 (1931) S. 7.

<sup>3</sup> BORMANN, E. u. J. SEILER: ETZ Bd. 49 (1928) S. 239. — DAWES, C. L. u. A. F. DANIEL: Trans Amer. Inst. electr. Engrs. Bd. 51 (1932) S. 108.

**Präzisionsmeßbrücke nach GIEBE und ZICKNER (Substitutionsverfahren).** Anwendungsbereich: Dielektrische Verlustfaktormessungen, Kapazitätsmessungen an kleinen und großen Isolierstoffproben bei 800 Hz bis 100 kHz und Niederspannung.

Die genauesten Meßergebnisse bei Niederspannung sind durch Substitution der unbekanntes Kapazität durch einen veränderlichen Normal-kondensator in der Brückenschaltung nach SCHERING möglich. Dieses Verfahren ist von GIEBE und ZICKNER<sup>1</sup> zu einer Präzisionsbrücken-anordnung entwickelt worden.

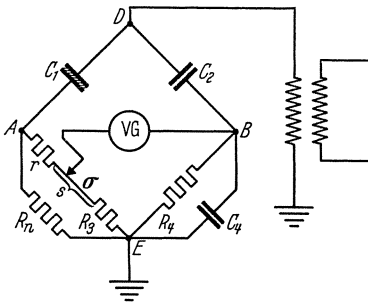


Abb. 70. Erweiterte Schering-Brücke, Schaltanordnung.

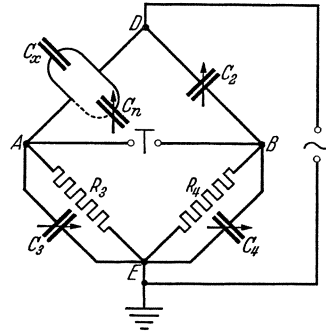


Abb. 71. Präzisionsmeßbrücke nach GIEBE und ZICKNER.

Das Schema der Brücke ist in der Abb. 71 gezeichnet. Für den Fall, daß die Brückenweige bzw. die Widerstände  $R_3$  und  $R_4$  Fehlwinkel  $\varphi_3$  und  $\varphi_4$  aufweisen, ist angenähert

$$\frac{C_x}{C_2} = \frac{R_4}{R_3} \quad \text{und} \quad \text{tg } \delta - \text{tg } \delta_2 = \omega R_4 C_4 - \omega R_3 C_3 + \varphi_3 - \varphi_4. \quad (1)$$

Wird  $C_x$  durch einen verlustfreien Normalkondensator  $C_N$  ersetzt und die Brücke durch Regeln von  $C_N$  und  $C_4$  wiederum abgeglichen, so gilt

$$\frac{C_N}{C_2} = \frac{R_4}{R_3}; \quad -\text{tg } \delta_2 = \omega R_4 (C_4 - \Delta C_4) - \omega R_3 C_3 + \varphi_3 - \varphi_4. \quad (2)$$

Die Differenz der beiden Ablesungen ergibt

$$C_x = C_N$$

$$\text{tg } \delta_x = \omega R_4 \Delta C_4.$$

Aus den Gleichungen (1) und (2) ersieht man, daß die in der üblichen Schering-Brücke noch vorhandenen Fehlermöglichkeiten durch Phasenverschiebungen in den Brückenweigen 3 und 4 durch die Differenzbildung eliminiert worden sind. Stehen veränderliche Hochspannungsnormalkondensatoren zur Verfügung, so ist das Verfahren auch bei höheren Spannungen anwendbar. Ist der unbekanntes Kondensator durch einen

<sup>1</sup> GIEBE, E. u. G. ZICKNER: Arch. Elektrotechn. Bd. 11 (1922) S. 109; Z. Instrumenten Bd. 53 (1933) S. 1, 49, 97.

ihm nur angenähert gleichen Normalkondensator zu ersetzen, der als zweite Brückeneinstellung eine kleine Veränderung des Widerstandes  $R_3$  um  $\Delta R_3$  erfordert, so gilt angenähert

$$C_x = C_N \frac{R_3 + \Delta R_3}{R_3}$$

$$\operatorname{tg} \delta_x = \omega R_4 \Delta C_4 - \omega \Delta R_3 C_3.$$

Bei Präzisionsmessungen muß der Aufbau sorgfältig getroffen werden, um Fehler durch die Selbstinduktion in den Zuleitungen bei großen Leiterschleifen oder durch unvollständige Abschirmung zu vermeiden. Eine symmetrische Anordnung mit bifilarer Leitungsführung und voll-

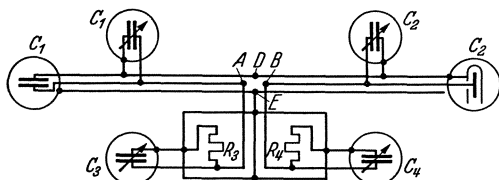


Abb. 72. Präzisionsmeßbrücke in symmetrischer Anordnung.

ständige Abschirmung ist in der Abb. 72 gezeichnet. An die Punkte  $AB$  führt die Galvanometerleitung, an die Punkte  $ED$  die Spannungsleitung, die beide verdreht in geerdeten Metallrohren an die

Anordnung herangeführt werden. Die Genauigkeit der Anordnung beträgt für Kapazitätsmessungen Bruchteile eines pF, der Verlustfaktor kann auf  $1 \cdot 10^{-4}$  genau ermittelt werden.

**Messung großer Verlustfaktoren bei Niederfrequenz im Substitutionsverfahren.** Die oben angegebenen Formeln sind für das Substitutionsverfahren unter den üblichen Vernachlässigungen abgeleitet worden. Bei genauen Messungen und Verlustfaktoren über 0,1 gelten die strengen Ableitungen

$$C_x = C_N \left( 1 - \frac{\operatorname{tg} \delta \cdot \operatorname{tg} \varphi_4}{1 + \operatorname{tg}^2 \varphi_4} \right),$$

$$\operatorname{tg} \delta_x = \frac{\operatorname{tg} \delta}{1 - \operatorname{tg} \delta \cdot \operatorname{tg} \varphi_4 + \operatorname{tg}^2 \varphi_4}$$

wobei

$$\operatorname{tg} \delta = \omega R_4 \Delta C_4 \left( 1 + \frac{C_Z}{C_N} \right), \quad \operatorname{tg} \varphi_4 = \omega R_4 C_4$$

und  $C_Z$  die im Brückenweig zu  $C_x$  parallel liegende Kapazität bedeuten<sup>1</sup>.

**Messung kleiner Kapazitäten.** Als Prüfkörper stehen für die Untersuchung oft nur sehr kleine Proben zur Verfügung. Diese ergeben mit Elektroden versehen nur eine kleine Kapazität. Sie kann durch Vergleich mit einem Normalkondensator  $C_N$  ohne Anfangskapazität nach ZICKNER in dem Brückenschema der Abb. 73 ermittelt werden. Alle Leitungen müssen sorgfältig abgeschirmt sein. Durch entsprechende Wahl der Widerstände  $R_3$  und  $R_4$  ist ein handlicher Brückenaufbau möglich, der gestattet, im kleinsten Meßbereich Kapazitäten von 0,005 bis

<sup>1</sup> BLECHSCHMIDT, E.: Phys. Z. Bd. 39 (1938) S. 212, dort auch Formeln für die Resonanzbrücke.

1 pF, im größten Meßbereich Kapazitäten bis 100 pF zu messen. HARTSHORN verwendet für die Messungen kleiner Kapazitäten eine modifizierte Schering-Brücke nach Abbildung 74. Um die für die Einstellung des Brückengleichgewichtes nötigen kleinen Kapazitätsänderungen bequem vornehmen zu können, wendet er eine Reihenschaltung von 2 Kapazitäten an.  $C_1$  und  $C_2$  sind 2 Glimmer-Kondensatoren von je  $0,01 \mu\text{F}$  parallel mit zwei veränderlichen Luftkondensatoren von  $0,002 \mu\text{F}$ ,  $c_1$  und  $c_2$  sind 2 Glimmerkondensatoren von je  $0,001 \mu\text{F}$ . Alle Kapazitäten sind abgeschirmt. Der Vorteil dieser Kombination liegt darin, daß eine Änderung des regelbaren Luftkondensators um 1 pF die Kapazität der Reihenschaltung erst um  $\frac{1}{100}$  pF ändert und so eine genaue Substitution von  $C_x$  ermöglicht. Diese Änderung ist allerdings nicht linear.

**Brücken mit Hilfszweig.** In den bisher angegebenen Brückenschaltungen ist der eine Pol der Spannungsquelle geerdet. Der Brückenweig mit Vibrationsgalvanometer oder Telefon befindet sich daher auf einem Potential und besitzt gegen Erde Teilkapazitäten, die sich zu den Brückenweigen 3 oder 4 parallel legen. Das ist besonders bei Messungen mit dem Telefon unangenehm, da der Beobachter, der den Telephonhörer am Ohr hat, die Kapazität des Nullzweiges in unübersehbarer Form vergrößert. Um diese Teilkapazitäten zu vermeiden, bringt man durch einen Hilfszweig nach WAGNER<sup>1</sup> die Brückenpunkte AB auf Erdpotential. Das Schaltprinzip ist in der Abb. 75 gezeichnet. Der Hilfszweig FGH ist wie ein Zweig der Brücke aufgebaut. Ist die ungeerdete Brücke abgeglichen, so

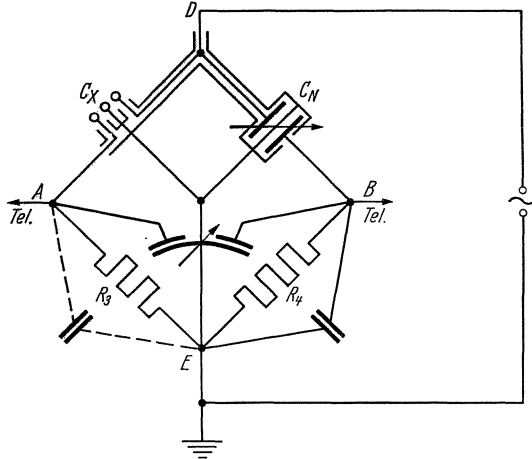


Abb. 73. Brückenordnung für die Messung sehr kleiner Kapazitäten nach ZICKNER.

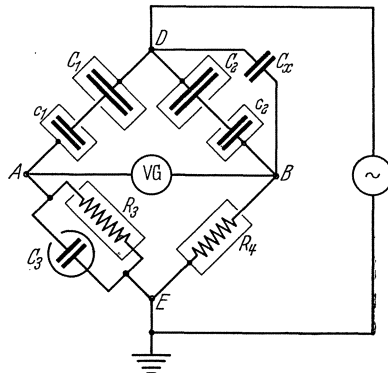


Abb. 74. Brückenordnung nach HARTSHORN zur Messung kleiner Kapazitätsänderungen.

<sup>1</sup> WAGNER, K. W.: Zur Messung dielektrischer Verluste mit der Wechselstrombrücke. ETZ Bd. 32 (1911) S. 1001 und Bd. 33 (1912) S. 635.

bedeutet das, daß sich die Punkte  $AB$  auf gleichem, nicht jedoch auf Erdpotential befinden. Das Vibrationsgalvanometer wird anschließend

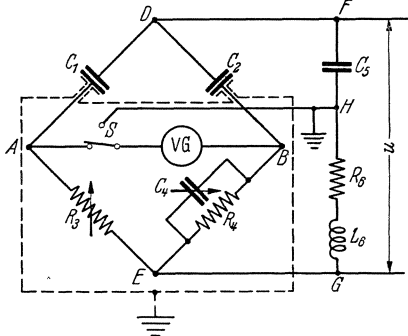


Abb. 75. Wagnerscher Hilfszweig.

von Bedeutung. Bei der Messung von Teil- und Betriebskapazitäten von Fernsprechkabeln wird er allgemein angewandt.

Eine zweite Art Hilfszweig<sup>1</sup> hat ebenfalls für die Isolierstofftechnik Bedeutung erlangt. In der Schering-Brücke geben die Teilkapazitäten

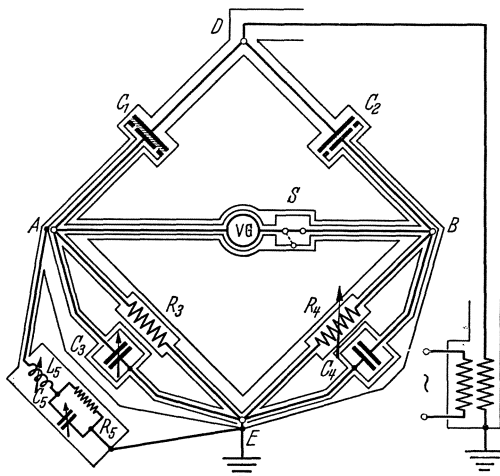


Abb. 76. Hilfszweig für Hochspannungsbrücke.

man die Brücke mit dem Brückengalvanometer durch den Schalter  $S$  einmal über den Hilfszweig, das andere Mal über die ursprüngliche Brückenschaltung abgleicht.

Da der Hilfszweig seinerseits wieder eine wenn auch kleine Spannung gegen Erde führt, ist er ebenfalls mit einer metallischen Abschirmung zu umgeben. Derartige Brückenanordnungen erschweren wegen der

durch den Schalter  $S$  mit dem geerdeten Punkt  $H$  verbunden und die Brücke durch Regeln des Hilfszweiges an  $R_6$  und  $L_6$  abgeglichen. Dann befindet sich  $B$  nahezu auf Erdpotential. Wird das Nullgalvanometer wieder mit den Punkten  $AB$  verbunden, so kann die Abgleichung der Brücke genauer vorgenommen und so nach und nach die Brücke abgeglichen werden.

Der Hilfszweig ist für Brücken mit Telefon als Nullinstrument

von Bedeutung. Bei der Messung von Teil- und Betriebskapazitäten von Fernsprechkabeln wird er allgemein angewandt. Eine zweite Art Hilfszweig<sup>1</sup> hat ebenfalls für die Isolierstofftechnik Bedeutung erlangt. In der Schering-Brücke geben die Teilkapazitäten  $C_1^{20}$  und  $C_2^{20}$  Veranlassung zu Fehlmessungen, da diese Teilkapazitäten so wirken, als ob sie parallel zu den Brückenzeigen 3 und 4 liegen. Man kann sie unterdrücken, wenn man dafür sorgt, daß zwischen der Niederspannungselektrode und den Schutzringen keine Spannungsdifferenz besteht. Wird z. B. der Schutzring des Prüflings  $C_1$  nicht direkt, sondern über einen Hilfszweig mit dem Index 5 nach Abb. 76 geerdet, so läßt sich diese Forderung erfüllen, indem

<sup>1</sup> BELDI, F.: Bull. schweiz. elektrotechn. Ver. Bd. 21 (1930) S. 197.



doppelten Abschirmung das Arbeiten. Sie sind da anzuwenden, wo es auf äußerste Genauigkeit ankommt. Das setzt wiederum voraus, daß die gemessenen Größen, Kapazität und Verlustfaktor, weitgehend unveränderlich sind.

Eine modifizierte Schering-Brücke mit Wagnerschem Hilfszweig zeigt die Abb. 77. Sie ist nach amerikanischen Mitteilungen bei Niederspannung für Frequenzen von 25 Hz bis 1 Million Hz brauchbar.  $R_2$  und  $R_4$  sind kapazitäts- und induktivitätsfreie Widerstände von etwa

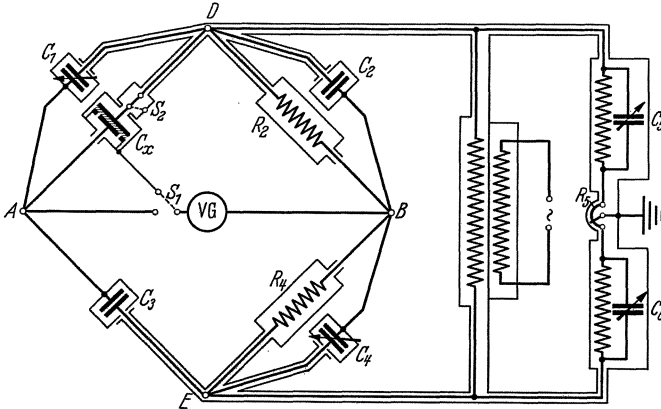


Abb. 77. Modifizierte Schering-Brücke mit Wagnerschem Hilfszweig.

10000  $\Omega$  für Messungen bis 10000 Hz und etwa 1000  $\Omega$  für Messungen bis zu 1 Million Hz. Bei eingeschaltetem  $C_x$  wird die Brücke durch Regeln von  $C_1$  und  $C_4$  abgeglichen, dann wird der Hilfszweig durch Umliegen des Schalters  $S_1$  (in der Abb. 77 gestrichelt angegeben) angeschaltet und durch Regeln von  $C_5$ ,  $C_6$  und  $R_5$  abgeglichen. Ist durch wiederholtes Umschalten der vollständige Abgleich erreicht, werden die Werte von  $C_1$  und  $C_4$  notiert. Darauf wird  $C_x$  durch den Schalter  $S_2$  abgeschaltet. Der Abgleich dieser geänderten Brückenordnung liefert die Werte  $C'_1$  und  $C'_4$ . Es gilt dann für

$$C_x = C_1 - C'_1$$

$$\operatorname{tg} \delta_x = \frac{C_1}{C_1 - C'_1} \cdot \omega \cdot R_4 (C'_4 - C_4).$$

Die genauen Gleichungen lauten

$$C_x = \frac{C_1 (1 + \operatorname{tg} \gamma_4 \operatorname{tg} \delta_1)}{1 + \operatorname{tg} \gamma'_4 \operatorname{tg} (\delta_1 + \gamma'_4 - \gamma_4)} - C'_1$$

$$\operatorname{tg} \delta_x = \left(1 + \frac{C'_1}{C_x}\right) \operatorname{tg} (\delta_1 + \gamma'_4 - \gamma_4) - \frac{C'_1}{C_x} \operatorname{tg} \delta'_1$$

wo

$$\begin{aligned} \operatorname{tg} \delta_1 &= \frac{1}{\omega C_1 R_1}, & \operatorname{tg} \delta'_1 &= \frac{1}{\omega C'_1 R'_1} \\ (\text{Verlustfaktoren des Kondensators } C_1 \text{ bzw. } C'_1) \\ \operatorname{tg} \gamma &= \omega C_4 R_4 \\ \operatorname{tg} \gamma'_4 &= \omega C'_4 R_4 \end{aligned}$$

bedeuten.

**Wien-Brücke** (Anwendungsbereich: Für Kapazitäts- und Verlustfaktormessungen bei Niederspannung und Frequenzen von 25 Hz bis 1 Million Hz.)

Hier erfolgt der Abgleich durch einen Widerstand  $R_3$  in Reihe zum Kondensator  $C_3$ . Das Brückenschema zeigt die Abb. 78.  $R_2$  und  $R_4$

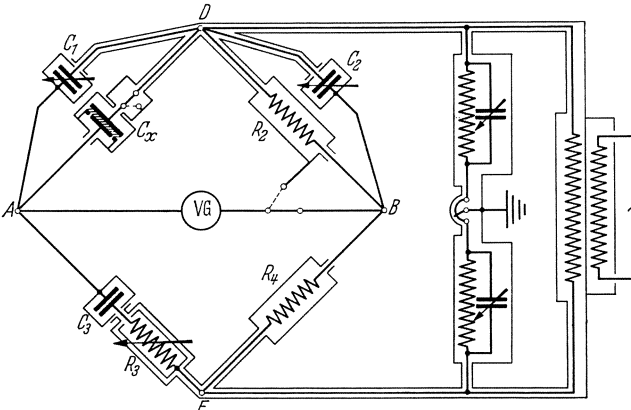


Abb. 78. Wiensche Brücke.

sind zwei gleiche kapazitäts- und induktionsfreie Widerstände von  $10000 \Omega$  für Frequenzen bis  $100000 \text{ Hz}$  und von  $1000 \Omega$  für Messungen bis zu  $1000000 \text{ Hz}$ .  $R_3$  ist ein regelbarer Widerstand bis zu etwa  $100000 \Omega$ . Der Luftkondensator  $C_2$  ist erforderlich, um eine Brückeneinstellung zu bekommen, wenn  $C_1$  allein eingeschaltet ist. Der Hochohmwiderstand  $R_3$  ist doppelt geschirmt, um definierte Verhältnisse gegen Erde zu haben. Durch seine Größe und die doppelte Schirmung hat die Brücke an Bedeutung verloren. Der Abgleich erfolgt durch Regeln von  $R_3$  und  $C_2$  und es gilt

$$C_x = C_1 - C'_1 \quad (1)$$

$$\operatorname{tg} \delta_x = \frac{C_1}{C_1 - C'_1} \cdot \omega C_3 (R'_3 - R_3) \quad (2)$$

oder wenn statt der Substitution das direkte Vergleichsverfahren angewandt wird

$$\begin{aligned} C_x &= C_3 \frac{R_4}{R_2} \\ \operatorname{tg} \delta_x &= \omega C_3 R_3 - \omega C_2 R_2. \end{aligned}$$

Die genauen Gleichungen zu (1) und (2) sind den ASTM Standards on Electrical Insulating Materials zu entnehmen. Sie kommen für Isolierstoffuntersuchungen kaum in Betracht.

**Kapazität  $C_x$  und Widerstand parallel.** (Für Kapazitäts- und Verlustwinkelmessungen bei Niederspannung und 25 Hz bis 1 Million Hz.) In Abänderung der Wienschen Brücke kann der Widerstand auch parallel zum Prüfling nach der Abb. 79 angeordnet werden.  $R_1$  und  $R_3$  sind kapazitäts- und induktionsfreie Widerstände von 10000  $\Omega$ ,  $R_4$  ein Festwiderstand von 100000  $\Omega$ .  $R_2$  soll regelbar sein bis zu dem Werte von  $R_4$  (Dekaden-Widerstand von 111110  $\Omega$ ). Die Änderung der Kapazität

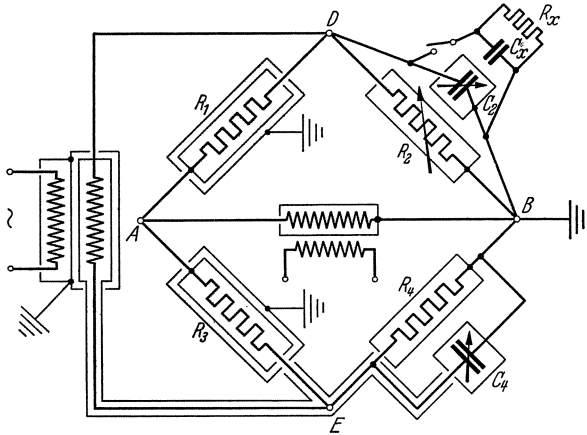


Abb. 79. Brücke mit Widerstand parallel zum Kondensatorprüfling.

dieses Widerstandes soll möglichst gering sein. Die Gleichgewichtsbedingungen für das Brückenschema lauten, wenn der unbekannte Kondensator durch einen Normalkondensator substituiert wird,

$$C_x = C_2 - C'_2$$

$$\operatorname{tg} \delta_x = \frac{(R_2 - R'_2)}{\omega R_2 R'_2 (C_2 - C'_2)}.$$

Wird im direkten Vergleichsverfahren gemessen, d. h. ist  $C_1$  ein regelbarer Normalkondensator und ist  $C_2$  ausgeschaltet, so gilt<sup>1</sup>:

$$C_x = C_4 \frac{R_3}{R_1}$$

$$\operatorname{tg} \delta_x = \frac{1}{\omega C_4 R_4} - \frac{1}{\omega C_x R_2}.$$

Die technische Durchbildung dieser Brückenordnung für Hochfrequenzmessungen ist von H. NUMAKURA und R. TUKAMOTO ausführlich beschrieben worden<sup>2</sup>.

<sup>1</sup> Über die genauen Formeln hierzu siehe ASTM Standards on Insulating Materials.

<sup>2</sup> NUMAKURA, F. H. u. R. TUKAMOTO: Electrotechn. J., Tokio Bd. 2 (1938) S. 116.

Die angegebenen Brückenschaltungen werden neben vielen anderen als Standardbrücken mit geringen Abweichungen in den Laboratorien der ganzen Welt benutzt. Sie lassen sich aus einzelnen, winkelfehlerfreien Schaltelementen unter Beachtung der Hinweise betreffend Schirmung und Erdung selbst zusammenstellen. Sind die einzelnen Glieder nicht winkelfehlerfrei, so können bei der Verlustfaktormessung erhebliche Fehler auftreten, während die Kapazitätswerte noch richtig gemessen werden.

**Weitere Brückenverfahren.** Es ist nicht Aufgabe dieses Buches, alle Kapazitäts- und Verlustwinkelmeßbrücken aufzuzählen oder zu beschreiben. Auch eine kurze Einteilung der übrigen Brücken nach einem Schema soll unterbleiben, da es aus dem Rahmen dieses Buches fällt. Die Verwendung von Selbstinduktionen in Verlustwinkelmeßbrücken wurde nicht behandelt, da Brücken mit Selbstinduktionen für die Prüfung von Isolierstoffen nicht die Bedeutung erlangt haben, wie die kapazitiv Ohmschen Brücken<sup>1</sup>. Einige Literaturstellen und Brückenanordnungen, die unter den Namen verschiedener Wissenschaftler bekannt geworden sind, sollen lediglich im folgenden angegeben werden.

#### Schrifttum.

WIEN, MAX: Messung der Induktionskonstanten mit dem optischen Telephon. Ann. Phys., Lpz. Bd. 44 (1891) S. 697.

HANAUER, J.: Über die Abhängigkeit der Kapazität eines Kondensators von der Frequenz der benutzten Wechselströme. Ann. Phys., Lpz. Bd. 65 (1898) S. 789.

STROUD, W. u. J. H. OATES: Über die Verwendung von Wechselströmen für die Eichung von Kondensatoren und für den Vergleich von Kapazitäten mit Induktivitäten. Phil. Mag. (6) Bd. 6 (1903) S. 707.

TERRY, E. M.: Über die Änderung der Kapazität eines Kondensators mit der Temperatur. Phys. Rev. Bd. 21 (1905) S. 193.

GROVER, F. W.: Gleichzeitige Messung von Kapazität und Verlustfaktor von Kondensatoren. Bull. Bur. Stand. Bd. 3 (1907) S. 375.

MONASCH, B.: Über den Energieverlust im Dielektrikum in wechselnden elektrischen Feldern. Ann. Phys., Lpz. Bd. 22 (1907) S. 905.

CAMPBELL u. ECKERSLEY: Über die Isolation von Induktionsspulen. Electr. Bd. 64 (1910) S. 350.

SCHERING, A. u. E. ALBERTI: Eine einfache Methode zur Prüfung von Stromwandlern. Arch. Elektrotechn. Bd. 2 (1914) S. 263.

HOHLE, N.: Eine tragbare Stromwandler-Prüfeinrichtung hoher Genauigkeit. Arch. Elektrotechn. Bd. 27 (1933) S. 849.

<sup>1</sup> Verfahren zum Vergleich von Kapazitäten mit Selbstinduktionen können zur Messung von Verlustwinkeln benutzt werden, MEYER: ETZ Bd. 52 (1931) S. 985; bei Hochspannung siehe DAWES, HOOVER, REICHARD: Amer. Inst. electr. Engrs. Bd. 48 (1929) S. 450 — KAUTZMANN: ETZ Bd. 50 (1929) S. 1402. — PUGNO VANONI: Elettrotecnica Bd. 17 (1930) S. 2. — DETTMAR: ETZ Bd. 53 (1932) S. 935. — Ein genaues Verfahren zur Kapazitäts- und Verlustmessung mit Hilfe einer Gegeninduktivität durch Abwandlung der Carey-Foster-Brücke siehe N. F. ASTBURY u. L. H. FORD: Proc. phys. Soc., Lond. Bd. 51 (1938) S. 37.

ROSEN, A.: Die Verwendung der Wienschen Brücke für die Messung der dielektrischen Verluste bei Hochspannung unter besonderer Berücksichtigung der Kabel. Proc. phys. Soc., Lond. Bd. 35 (1923) S. 235.

NERNST, W.: Über die Verwendung schneller elektrischer Schwingungen in der Brückenkombination. Ann. Phys., Lpz. Bd. 60 (1897) S. 600.

FLEMING, J. A. u. G. B. DYKE: Über den Verlustfaktor und die Leitfähigkeit der Dielektrika bei Wechselspannung und Hörfrequenzen in Abhängigkeit von der Temperatur. J. Inst. electr. Engrs. Bd. 49 (1912) S. 323.

FLEMING, J. A. u. W. C. CLINTON: Über die Messung kleiner Kapazitäten und Induktivitäten. Proc. phys. Soc., Lond. Bd. 18 (1903) S. 386.

BUTTERWORTH, S.: Über die Verwendung der Anderson-Brücke zur Messung der Veränderung eines Kondensators und seines Wirkwiderstandes mit der Frequenz. Proc. phys. Soc., Lond. Bd. 34 (1921) S. 1.

HAWORTH, H. F.: Die Messung elektrolytischer Widerstände mit Wechselströmen. Trans. Faraday Soc. Bd. 16 (1921) S. 365.

TAYLOR, A. H.: Ein Verfahren für die Bestimmung des elektrolytischen Widerstandes und der Kapazität bei Wechselspannungen. Phys. Rev. Bd. 24 (1907) S. 402.

SCHWENKHAGEN, H.: Die Messung dielektrischer Verluste von Anlageteilen ohne Vergleichskondensator. Arch. Elektrotechn. Bd. 28 (1934) S. 310.

GROVER, F. W.: Die Kapazität und der Verlustwinkel paraffinierter Papierkondensatoren in Abhängigkeit von der Temperatur und Frequenz. Bull. Bur. Stand. Bd. 7 (1911) S. 498.

BUTMAN, C. A.: Ein handliches und genaues Verfahren für dielektrische Prüfungen. Electr. Wld. Bd. 71 (1918) S. 502.

CAMPBELL, A.: Eine Kapazitätsmeßbrücke mit großem Meßbereich und ein neues Induktometer. Proc. phys. Soc., Lond. Bd. 39 (1927) S. 145.

DAWES, C. L. and P. L. HOOVER: Ionization in papierisolierten Kabeln. J. Amer. Inst. electr. Engng. Bd. 45 (1926) S. 337; Bd. 48 (1929) S. 3 u. 450.

GEYGER, W. u. H. SCHERING: Bemerkungen zu der Arbeit von G. BENISCHKE: Eine einfache Brücke zur Messung der Kapazität und des Verlustwiderstandes. Arch. Elektrotech. Bd. 17 (1926) S. 423 u. 426.

KAUTZMANN, O.: Die Messung dielektrischer Verluste mit der SCHERINGSchen Meßbrücke an Hartpapierdurchführungen und Generatoren in Anlagen. ETZ Bd. 50 (1929) S. 1401.

WIRK, A.: Absolute Verlustfaktorbestimmung bei der dielektrischen Werkstoffprüfung. Z. techn. Phys. Bd. 15 (1934) S. 487.

KÜPFMÜLLER, K. u. P. THOMAS: Wechselstrombrücke zum Messen der Scheinwiderstände von Fernsprechkabeln. ETZ Bd. 43 (1922) S. 461.

KÜHLE, J.: Eine einfache Kompensationschaltung zur Messung der Betriebswerte von Kapazität und Ableitung an Fernsprechkabeln. ETZ Bd. 43 (1922) S. 1205.

WITTING, R.: Über eine neue Methode zur Messung komplexer Widerstände. Z. techn. Phys. Bd. 15 (1934) S. 669.

CHURCHER, B. G.: Wechselstrombrückenverfahren, ihre Anwendung auf elektrotechnische Probleme, insbesondere auf die Prüfung von Generatoren. Electr. Bd. 101 (1928) S. 518 u. 545.

KRÖNERT, J.: Meßbrücken und Kompensatoren, München-Berlin 1935, dort auch weiteres ausführliches Schrifttum.

**Technische Ausführungen von Wechselstrombrücken.** Die Brückenverfahren zur Messung von Kapazität und dielektrischem Verlustfaktor haben zur Entwicklung von technischen Meßbrücken geführt, die

in einem Gerät handlich vereinigt mehrere Brückenglieder, gegebenenfalls auch das Nullinstrument enthalten und so mit wenigen Handgriffen schwierige Messungen schnell durchzuführen gestatten.

1. Brücke für Hochspannung und 50 Hz nach SCHERING<sup>1</sup>. In der technischen Ausführung hergestellt von der Firma Hartmann & Braun sind in einem Brückenkasten vereinigt der Präzisions-Festwiderstand  $R_4 = 1000/\pi = 318 \Omega$ , ein Umschalter für die Benutzung der erweiterten Brückenschaltung (s. S. 116), ein Widerstandsschleifdraht  $S$  von  $0,12 \Omega$ , der dem Widerstand  $R_3$  zugeschaltet wird und die Anschlüsse für das Vibrationsgalvanometer nebst Umpoler. Außerhalb des Brückenkastens ist ein Fünfdekaden-Kurbelwiderstand  $R_3$ , ein Dreidekaden-Glimmerkondensator  $C_4$ , der Normalkondensator  $C_2$  sowie der zu messende Kondensator  $C_1$  anzuschließen. Für die technische Ausführung gilt für  $f = 50$  Hz, da  $R_4 = 1000/\pi$  ist,  $\operatorname{tg} \delta = 0,1 C_4$ , d. h.  $\operatorname{tg} \delta$  ist an  $C_4$  direkt abzulesen, sofern  $C_4$  in  $\mu\text{F}$  angegeben ist. Als Vergleichskondensator dient ein Hochspannungsnormalluft- oder Preßluftkondensator von etwa  $50$  pF. Für höhere Meßspannungen kann der Normalkondensator kleiner gewählt werden, da die Empfindlichkeit mit der Höhe der Brückenspannung ansteigt. Für die erweiterte Brückenschaltung, Hersteller Hartmann & Braun, ist eine Parallelschaltung von Nebenwiderständen  $R_N$  von  $30, 10, 3, 1$  und  $0,3 \Omega$  entsprechend einer Belastbarkeit des Brückenzeuges mit  $0,075, 0,25, 0,75, 2,5, 5,0$  A vorgesehen. Die Umschaltung der Widerstände ist so gewählt, daß  $R_N + r + s$  stets  $100 \Omega$  ist. Dadurch gilt für die abgeglichene Brücke

$$C_x = C_2 R_4 \frac{100 + R_3}{R_N (R_3 + \sigma)}$$

$$\operatorname{tg} = \omega R_4 C_4 - \omega R_4 C_2 \frac{100 - \sigma - R_N}{R_3 + \sigma}.$$

Das Schaltschema zeigt die Abb. 80.

Kleinere Widerstände als  $0,3 \Omega$  müssen außerhalb des Brückenkastens angeschlossen werden. Der Umschalter des Brückenkastens ist in diesem Fall auf die Klemme 100 (s. Abb. 80) einzustellen. Mit einem Nebenwiderstand von  $R_N = 0,06 \Omega$  sind Messungen bei Ladeströmen bis zu  $30$  A möglich<sup>2</sup>. Bei der Messung des Verlustfaktors großer Kapazitäten ist darauf zu achten, daß nicht durch Übergangswiderstände oder Wider-

<sup>1</sup> SCHERING u. SCHMIDT: Z. Instrumentenkde Bd. 38 (1918) S. 1; ETZ Bd. 13 (1918) S. 410. — SEMM: Arch. Elektrotechn. Bd. 9 (1921) S. 30. — BIRNBAUM, H. W.: ETZ Bd. 19 (1924) S. 229. — BORMANN u. SEILER: ETZ Bd. 20 (1925) S. 114. — ROSENLOCHER u. RÜHLEMANN: Arch. Elektrotechn. Bd. 22 (1929) S. 21.

<sup>2</sup> Über Vorsichtsmaßnahmen gegen induktive Beeinflussung der Brückenzeuge untereinander und gegen Phasenverschiebungen in den Zweigen bei hohen Ladeströmen s. G. ZICKNER u. G. PFESTORF: Z. techn. Phys. Bd. 12 (1931) S. 210 und G. PFESTORF in R. VIEWEG: Elektrotechnische Isolierstoffe, Verlag Julius Springer Berlin 1937.

stände der Zuleitungen ein erhöhter Verlust vorgetäuscht wird. Bei großen Kapazitäten sind Bruchteile eines Ohms von Einfluß.

Die Meßgenauigkeit der Brückenordnung<sup>1</sup> ist je nach dem Meßbereich und der Spannung verschieden. Für relative Kapazitätsänderungen ist die Brücke sehr empfindlich. Die absolute Genauigkeit der Kapazitätsmessung ist von den übrigen Brückendaten abhängig und soll nicht überschätzt werden. Verlustfaktormessungen können absolut auf  $0,3 \cdot 10^{-3}$  sicher angegeben werden. Relative Änderungen von  $0,1 \cdot 10^{-3}$  sind abgleichbar. Bei der Untersuchung großer Kapazitäten ist es nötig,

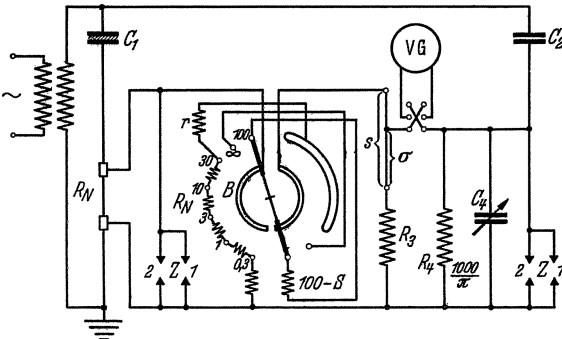


Abb. 80. Schaltschema der Schering-Brücke der Firma Hartmann & Braun.

parallel zu dem Dreidekaden-Glimmerkondensator noch einen Luftdrehkondensator bis 1000 pF zu schalten, um die Brücke genau abgleichen zu können<sup>2</sup>.

Die Ausführung durch die General Electric Co. Schenectady New York<sup>3</sup> enthält in einem geschirmten Gehäuse die Widerstände  $R_3$  und  $R_4$ , je 11 110  $\Omega$  in Stufen von 1  $\Omega$  sowie einen Hilfszweig nach S. 120, um Schutzring und Meßbelegung auf gleiche Spannung gegen Erde abzugleichen. Ein Verstärker im Nullzweig der Brücke sowie die Umschalter zum Abgleich von Brücke und Hilfszweig sind ebenfalls im Gerät untergebracht. Außerhalb werden das tragbare Mikroamperemeter über einen Kupferoxydgleichrichter sowie die Vergleichskondensatoren angeschlossen. Der Frequenzbereich ist 10 bis 1000 Hz. Die Empfindlichkeit der Brücke wird bei einer zu messenden Kapazität von 20 pF mit  $0,2 \cdot 10^{-3}$  für den Verlustfaktor angegeben. Der Wunsch, die Schering-Brücke zu einem tragbaren und handlichen Gerät umzubilden, ist in jüngster Zeit

<sup>1</sup> TSCHLASSNY: Arch. Elektrotechn. Bd. 18 (1927) S. 249. — BRADSHAW, E.: J. roy. techn. Coll. Glasg. Bd. 4 (1937) S. 144.

<sup>2</sup> Fa. Dr. phil. Max Ulrich Leipzig stellt Glimmerkondensatoren  $10 \times 0,1 + 10 \times 0,01 + 10 \times 0,001$  pF mit einem Drehkondensator von 1000 pF als vierte Stufe in einem gemeinsamen Gehäuse her.

<sup>3</sup> BOUSMAN, H. W.: Gen. Electr. Rev. Bd. 35 (1932) S. 295; s. a. Bd. 40 (1937) S. 522 die Abbildung einiger Prüfgeräte.

von SCHERING selbst verwirklicht worden. Dies war dadurch möglich, daß leichte Präzisionsraupen- und -schleifdrahtwiderstände für den Abgleich der Brücke technisch entwickelt worden waren, so daß der schwere und teure Glimmerkondensator  $C_4$  durch einen kleinen festen Papierkondensator ersetzt werden konnte. Das Schaltschema der neuen Brückenordnung zeigt Abb. 81. Außer dem Normalkondensator  $C_N$  und dem Prüfling  $C_x$  sind alle Teile der Brücke in einem Koffer eingebaut. In dem Schaltbild bedeuten  $R_N$  umschaltbare Widerstände zur Veränderung der Belastungsfähigkeit und damit des Meßbereiches,  $R_3$  einen kapazitäts- und induktionsfreien Widerstand,  $\alpha$  und  $\Delta C_x$  einen Schleifwiderstand bzw.

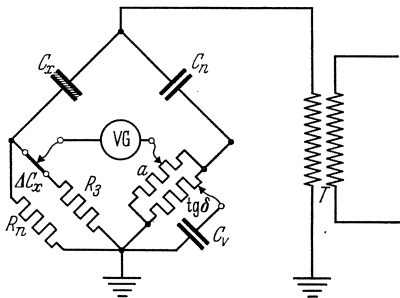


Abb. 81. Schering-Schleifdrahtbrücke.

$\Delta C_x$  einen Schleifwiderstand bzw. Schleifdraht zur Kapazitätsabgleichung,  $\text{tg } \delta$  einen Schleifdraht zur Verlustwinkelabgleichung,  $C_V$  einen Papierkondensator,  $VG$  ein Rumpisches Vibrationsgalvanometer mit Empfindlichkeitsregler und Abstimmrichtung. Durch eine Kurbel, die die Widerstände  $R_N$  umschaltet, wird der Kapazitätsmeßbereich eingestellt. Mit einem 100-pF-Normalkondensator können Kapazitäten von etwa 30 pF bis etwa 0,1  $\mu\text{F}$  bei einem Verlustwinkelmeßbereich von  $\text{tg } \delta$  bis zu 0,125 ( $7^\circ$  bis  $10'$ ) gemessen werden. Der Kapazitätsmeßbereich läßt sich ferner durch Wahl anderer Normalkondensatoren erweitern. Die höchstzulässige Meßspannung ist durch die größte zulässige Strombelastung der Nebenwiderstände  $R_N$  und damit durch die Kapazität des Prüflings gegeben. Die Strombelastbarkeiten in den einzelnen Bereichen werden von der Herstellerfirma Hartmann und Braun wie folgt angegeben:

Meßbereich 1 u. 2	$J = 0,01 \text{ A}$	Meßbereich 5	$J = 0,314 \text{ A}$
„ 3	$J = 0,0314 \text{ A}$	„ 6	$J = 1 \text{ A}$
„ 4	$J = 0,1 \text{ A}$	„ 7	$J = 3,14 \text{ A}$

Aus dem Schleifwiderstand  $\alpha$  und der am Schleifdraht  $\Delta C_x$  abgelesenen Werte ergibt sich unter Berücksichtigung der Stellung des Meßbereichschalters  $Z$  die Kapazität wie folgt:

$$C_x = \alpha \cdot Z \cdot C_N \cdot \frac{1}{100 \pm 0,1 \Delta C_x}.$$

Der dielektrische Verlustfaktor ist an einer Skala eines Schleifwiderstandes abzulesen. Die Skala ist direkt für  $\text{tg } \delta$  in  $\text{‰}$  bei  $f = 50 \text{ Hz}$  geeicht. Der Abgleich der Brücke erfolgt durch abwechslungsweise Regeln der beiden Widerstände  $\alpha$  und  $\text{tg } \delta$  sowie mit der Feinregulierung  $\Delta C_x$ . Ergibt sich in der Brückenschaltung ein  $\alpha < 30 \Omega$ , so ist zur



Erzielung größerer Meßgenauigkeit der Meßbereichschalter  $Z$  auf die nächstkleinere Stufe zu stellen und die Brücke neu abzugleichen. Bei abgeglicherer Brücke darf nach Umpolen im Galvanometer keine Bildverbreiterung auftreten. Ist dies der Fall, so sind die von äußeren Feldern herrührenden magnetischen Störungen zu beseitigen. Die Fehlergrenze beträgt bei Meßspannungen von etwa 3000 V aufwärts etwa 1% für die Kapazität und etwa 0,01% für den Verlustfaktor bei 50 Hz bei Verwendung eines Normkondensators von 100 pF und eines mit Gleichstrom erregten Vibrationsgalvanometers nach RUMP. Eine Verstellung des Schleifdrahtes für den Kapazitätsabgleich um 0,02% bewirkt bereits eine Verbreiterung des Lichtstreifens des Vibrationsgalvanometers. Damit erreicht die Brücke auch die mit dem normalen Gerät erzielbare Meßgenauigkeit kleiner Verlustfaktoren<sup>1</sup>.

2. Brücke für 50 Hz und Niederspannung. Eine geschirmte Schering-Brücke für Niederspannung mit zwei Verlustwinkelmeßbereichen stellt die General Radio Co., 30 State Street Cambridge A, Mass. her<sup>2</sup>. Durch einen Umschalter wird der Kondensator  $C_4$  an einen Abgriff von  $R_4$  gelegt und damit die Messung kleiner Verlustfaktoren erleichtert.

Als Anzeigegerät im Brückenweig dient ein Verstärker oder eine Kathodenstrahlröhre (siehe 3). Für schnelle Betriebskontrollen stellt die British Thomson Houston Co. Ltd.<sup>3</sup> eine Brückenordnung her, deren Schema in Abb. 82a wiedergegeben ist. Das Diagramm zeigt Abb. 82b. Als Nullinstrument in einer Hilfsbrücke, das auf Spannungslosigkeit durch Regeln von  $C$  eingestellt wird.

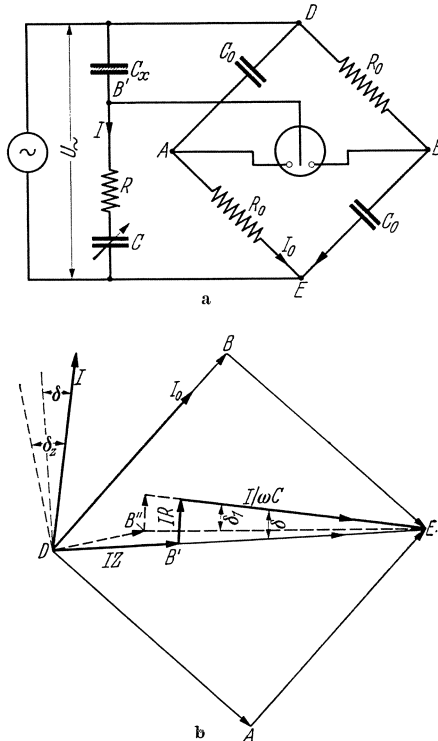


Abb. 82 a und b. Schaltschema und Vektordiagramm der Verlustwinkelmeßbrücke mit Elektrometer als Nullinstrument.

<sup>1</sup> Über Verlustfaktor-Brücken, die einen Schleifdraht zur Abgleichung benutzen, s. auch die Zusammenstellung im Arch. techn. Messen J 921—14 (Juli 1939).

<sup>2</sup> LAMSON, H. W.: Gen. Radio Exper. Bd. 13 (1938) S. 5.

<sup>3</sup> BRAY, G. R. R.: J. sci. Instrum. Bd. 10 (1933) S. 183.

Das Elektrometer ist ein Goldblatteinstrument mit zwei symmetrisch rechts und links angeordneten Hilfselektroden (s. Abb. 82a). Die Hilfselektroden liegen an einer Spannung, die um  $90^\circ$  gegen die Spannung  $U$  phasenverschoben ist. Diese wird der Hilfsbrücke, bestehend aus Widerstand und Kapazität, entnommen. Das Goldblatt selber ist an dem Verbindungspunkt  $B'$ , zwischen Prüfling und dem Normalkondensator in Reihe mit einem Widerstand, angeschlossen. Wenn der Normalkondensator mit dem Reihenwiderstand so abgeglichen ist, daß die Kombination denselben Verlustfaktor hat wie der Prüfling, so sind die Spannungsvektoren  $EB'$  und  $DB'$  in Phase, d. h.  $B'$  liegt auf der Geraden  $DE$  (s. Abb. 82 b). Da jetzt alle Punkte auf der Hilfslinie  $DE$  gleich weit entfernt von den Punkten  $A$  und  $B$  sind, sind auch die Spannungen  $B'B$  und  $B'A$  gleich, d. h. das Elektrometerblatt wird von beiden Hilfsschneiden gleich stark angezogen und bleibt in Ruhe. Es zeigt somit an, daß der Verlustfaktor des Prüflings  $C_x$  mit dem Verlustfaktor der Reihenschaltung  $R \cdot C$  übereinstimmt. Hat die Reihenschaltung  $R \cdot C$  einen niedrigeren Verlustfaktor  $\delta_1$  als der Prüfling ( $\delta_2$ ), so bekommt das Goldblatt eine Spannung, die durch den Vektor  $DB''$  dargestellt wird, d. h. das Elektrometer schlägt nach einer der Hilfsschneiden aus. Der Abgleich der Brücke erfolgt somit durch Regeln des Hilfskondensators  $C$ .

Der Kreis  $R \cdot C$  wird in Einheiten von  $\text{tg } \delta$  am Drehkondensator  $C$  geeicht. Das Elektrometer ist in der Brücke so angeordnet, daß es nur auf Unterschiede des Verlustfaktors anspricht und Kapazitätsänderungen nicht anzeigt. Auf diese Weise erfordert die Brückeneinstellung nur das Regeln von  $C$ . Die Genauigkeit dieser rohen Betriebsbrücke beträgt bei 400 V Meßspannung für  $\text{tg } \delta = 0,2$  etwa 1%, für  $\text{tg } \delta = 0,05$  etwa 5%. Die Genauigkeit kann durch höhere Brückenspannungen vergrößert werden. Die Brücke gestattet nur Messungen an Proben ohne Schutzring. Wenn  $C$  in pF geeicht ist und die zwei Hilfselektrometer-Elektroden mit den Punkten  $D$  und  $E$  verbunden werden, kann auch die Kapazität des Prüflings ermittelt werden.

3. Brücke für Kapazitäts- und Widerstandsmessungen der Firma N. V. Philips' Gloeilampenfabrieken Eindhoven Holland<sup>1</sup>. Sie gestattet die Messung von Kapazitäten von 10 pF bis 10  $\mu\text{F}$  sowie von Widerständen von 0,1  $\Omega$  bis 10 M $\Omega$ . Die Brücke ist durch das im Brücken-zweig benutzte Anzeigergerät bemerkenswert<sup>2</sup>. Statt Galvanometer oder Telephon wird eine Fünfpolverstärkerröhre nach Abb. 83 benutzt, die

<sup>1</sup> CATH, P. G.: Eine einfache elektrische Meßbrücke. Philips techn. Rdsch. Bd. 2 (1937) S. 270.

<sup>2</sup> Eine ähnliche Meßbrücke, geeignet für die Messung des dielektrischen Verlustfaktors von Isolierstoffen von  $1 \cdot 10^{-3}$  bis  $500 \cdot 10^{-3}$  mit dem gleichen Anzeigergerät wird von der General Radio Co. Cambridge A. Mass. hergestellt, s. L. E. PACKARD: Gen. Radio Exper. Bd. 13 (1938) Nr 1 S. 1.

die verstärkte Spannung einer kleinen Kathodenstrahlröhre<sup>1</sup> zuführt. Die Höhe der Spannung ist hier an der Gestalt eines leuchtenden Kreuzes zu erkennen. Die Elektronenstrahlröhren sind unter dem Namen „Magisches Auge“ bekannt. Verstärkerröhre und Kathodenstrahlröhre bilden das Nullinstrument. Die Eingangsimpedanz der Verstärkerröhre liegt dabei in der Brücke. Das Anzeigement besitzt einen für die Brückenmessungen erforderlichen hohen Innenwiderstand. Die Kathode der Elektronen-

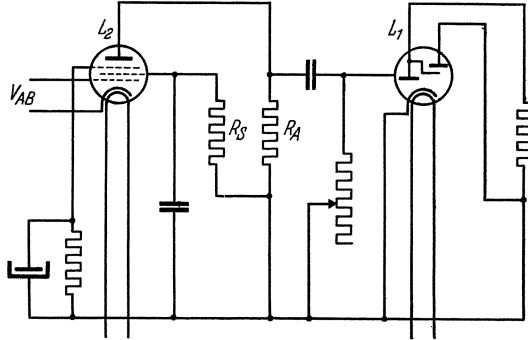


Abb. 83. Fünfpolverstärkerröhre mit Kathodenstrahlröhre.

strahlröhre (s. Abb. 84) ist auf ihrem unteren Teil konzentrisch von einem Gitter  $g$  umgeben. Der durch dieses Gitter regelbare Elektronenstrom fällt auf eine Anode  $a$ , die die gleiche Länge wie das Gitter hat und dieses konzentrisch umschließt. Mit der Anode ist ein Widerstand von  $2\text{ M}\Omega$  verbunden, dessen anderes Ende eine konstante Spannung  $V_A$  aus der Spannungsquelle erhält. Eine Änderung der Spannung zwischen Kathode und Gitter bewirkt somit eine Änderung des Spannungsabfalles an diesem Widerstand. Das obere Ende der Kathode ist durch eine zweite Anode umgeben. Sie hat die Form eines Kegelstumpfmantels. Die Kegelhachse fällt mit der Kathodenachse zusammen. Von oben blickt man also in die Innenseite des Kegels, der mit einem Stoff bedeckt ist, der von den auftreffenden Elektronen zum Fluoreszieren gebracht wird. Der Kegel ist unmittelbar an die Anodenspannung angeschlossen, also hinter dem Widerstand von  $2\text{ M}\Omega$ . Im Feld zwischen Kathode und Kegel sind vier senkrechte Drähte symmetrisch auf einem Ring um die Kathode befestigt. Zwei der Drähte ( $B$ ) sind in der Abb. 84 zu sehen. Sie sind im Röhreninneren mit der Anode  $a$  verbunden. Die 4 Drähte bewirken durch die Spannung, die auf sie gelangt, eine regelbare Störung der Feldverteilung zwischen Kathode

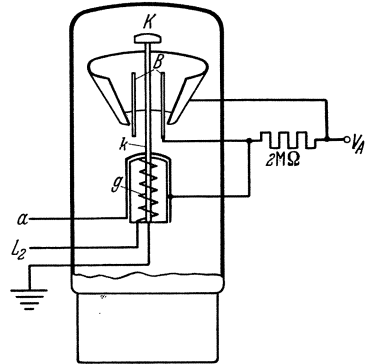


Abb. 84. Kathodenstrahlröhre als magisches Auge.

und Kegel. Die 4 Drähte bewirken durch die Spannung, die auf sie gelangt, eine regelbare Störung der Feldverteilung zwischen Kathode

<sup>1</sup> Philips Monatshefte f. Apparate-Fabrikanten 1936 Nr. 36, 1937, Nr. 52, 1938 Nr. 56. — LAMSON, H. W., Rev. sci. Instrum. Bd. 9 (1938) S. 272.

und Kegel. Wird durch Änderung der mit  $L_2$  verstärkten Brückenspannung die Spannung zwischen Kathode und Gitter geändert, so ruft der dadurch geänderte Anodenstrom des unteren Systems im Widerstand von  $2\text{ M}\Omega$  einen schwankenden Spannungsabfall hervor. Die Folge ist eine Änderung der Spannung auf den Streben, so daß sich die Flügel des Leuchtkreuzes, das infolge der Feldbeeinflussung der Streben an der Innenseite des Kegels entsteht, verbreitern oder verschmälern. Der mittleren Breite ist also ein schwankendes Breiter- und Schmälerwerden überlagert, das sich jedoch nicht mit dem Auge verfolgen läßt, so daß

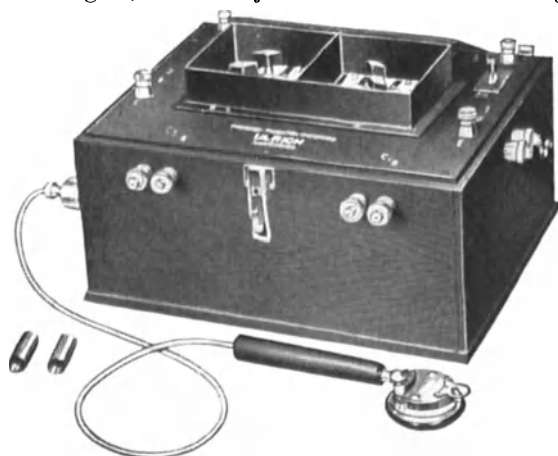


Abb. 85. Präzisionsbrücken für Niederspannung und Mittelfrequenzen.

immer die größte Breite des Leuchtkreuzes wahrgenommen wird. Diese Breite (der Winkel  $\varphi$ ) ist die Angabe des Kreuzlämpchens. Liegt an der Fünfpolröhre keine Spannung, so ist der Winkel am kleinsten. Es wird somit stets auf kleinste Strichbreite eingestellt, wenn die Spannung im Galvanometerzweig der Brücke auf Null geregelt werden soll. Der Gitterwiderstand des

Anzeigementes ist regelbar. Hierdurch kann die Empfindlichkeit, d. h. die Änderung von  $\varphi$  bei gegebener Spannungsänderung in der Brücke geändert werden. Die Empfindlichkeit ist abhängig von der Gitterspannung, sie beträgt  $25^\circ/\text{V}$ . Die Fünfpolröhre liefert eine 2000fache Verstärkung, so daß die Empfindlichkeit der Kombination der zwei Röhren etwa  $0,02\text{ mV}/^\circ$  beträgt.

4. Schering-Brücken für Niederspannung und Mittelfrequenz. Die Widerstände  $R_3$  und  $R_4$  besitzen gleiche Werte von  $10000\ \Omega$ , der Abgleich der Brücke erfolgt durch Regeln von  $C_2$ ,  $C_3$  und  $C_4$ .  $C_2$ , ein in pF geeichter Drehkondensator, ergibt die gesuchte Kapazität  $C_x$ , die den Widerständen parallel liegenden Kapazitäten  $C_3$  und  $C_4$  ermöglichen den Phasenabgleich. Zur Erweiterung des Kapazitäts- und Verlustfaktormeßbereiches können Drehkondensatoren oder Festkondensatoren zu  $C_2$  und  $C_4$  parallel geschaltet werden. Als Nullinstrument dient ein Telephon. Derartige Brücken für Betriebsmessungen werden von der Firma Dr. phil. Ulrich, Leipzig hergestellt. Eine ähnliche Einrichtung liefert die General Radio Co., Cambridge A, für direkte Ablesungen und für Substituierung des unbekanntem Konden-

sators<sup>1</sup>. Die Firma Dr. phil. Ulrich baut ferner die Präzisionsbrückeneinrichtung nach GIEBE und ZICKNER für Mittelfrequenzen (Abb. 85). Sie

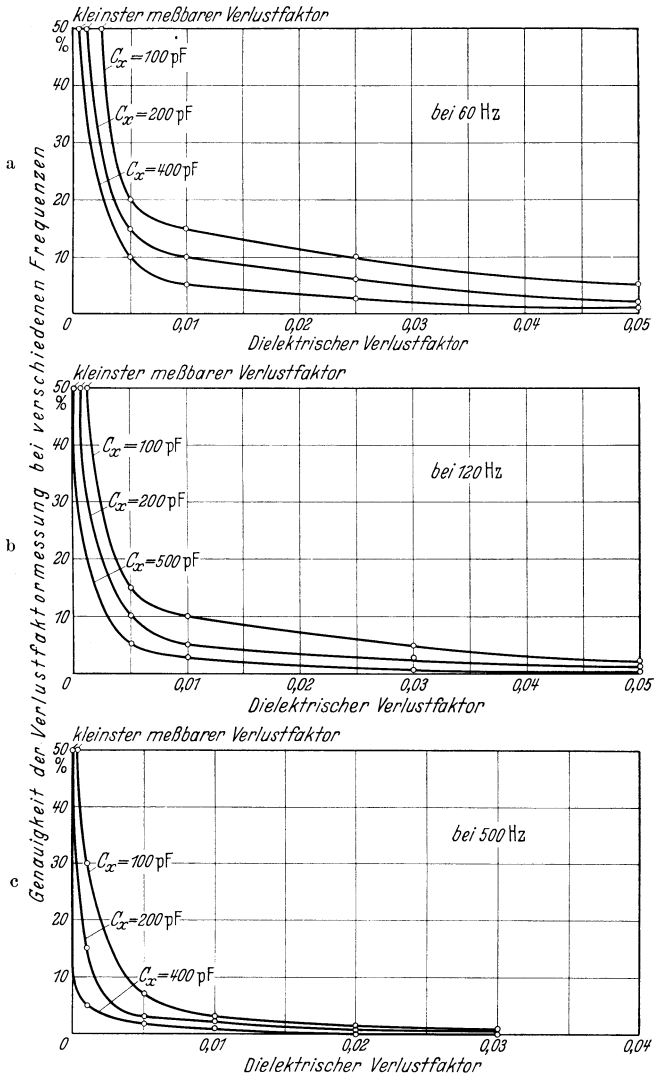


Abb. 86 a bis c. Genauigkeit der Messung mit Brückenanordnungen der General Electric Co.

gestattet nach dem Substitutionsverfahren nicht die unmittelbare Ablesung der gemessenen Werte, aber ergibt die genauesten Meßwerte. Der Anschluß der Normalkondensatoren erfolgt außerhalb des Brückenkastens.

<sup>1</sup> Gen. Radio Exper. Bd. 11 (1936) Nr. 7 S. 1.

Im Brückenkasten sind die bifilaren Anschlußleitungen sowie die umschaltbaren, kapazitäts- und induktionsfreien Widerstände angeordnet. Der Meßbereich geht von etwa 1 pF bis etwa 1  $\mu$ F. Kapazitätsänderungen

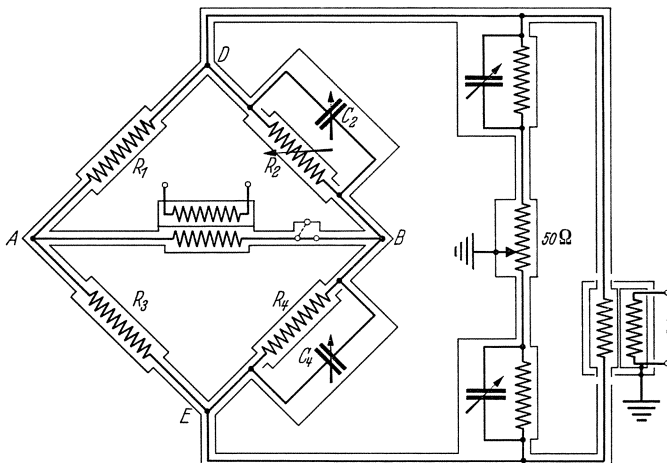


Abb. 87. Abgeschirmte Parallelwiderstandsbrücke mit Hilfszweig.

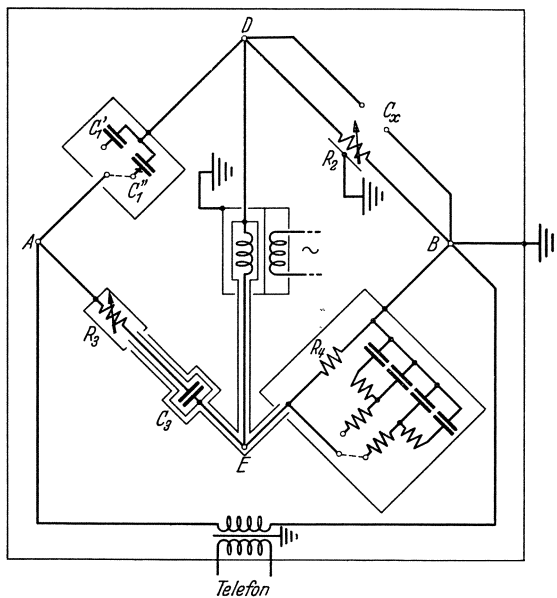


Abb. 88. Brückenordnung der Bell Telephone Laboratories Inc.

von 0,01 pF sind noch festzustellen. Die Verlustfaktoren können auf Bruchteile von  $0,1 \cdot 10^{-3}$  genau gemessen werden, eine Genauigkeit, die über das in der Praxis der Isolierstoffuntersuchungen erforderliche Maß

hinausgeht, da die Unterschiede, die sich bei verschiedenen Elektrodenbelegungen ergeben, wesentlich größer sind.

5. Wiensche Brücke und Brücke mit Parallelwiderstand zu dem Prüfling  $C_x$ . Diese Brückenordnungen (s. Abb. 78 und 79) mit Verstärker im Nullzweig werden von der General Electric Co. und der General Radio Company hergestellt. Über die Genauigkeit, mit der in diesen Brückenordnungen der dielektrische Verlustfaktor bei verschiedenen Frequenzen bestimmt werden kann, geben die Abb. 86 a bis c Auskunft. Eine Beschreibung der technischen Durchbildung siehe bei W. A. FORD und S. I. REYNOLDS<sup>1</sup>. Die Schaltanordnung der vollkommen abgeschirmten Parallelwiderstandsbrücke mit Hilfszweig zeigt die Abb. 87. Die unbekannte Kapazität wird dem Kondensator  $C_2$  parallel geschaltet. Im Substitutionsverfahren ergibt sich aus zwei Brückeneinstellungen für

$$C_x = C_2 - C_2'$$

$$G_x = \frac{R_2 - R_2'}{R_2 \cdot R_2'}$$

Von der Firma Bell Telephone Laboratories Inc., New York, wird eine Brücke hergestellt, deren Schaltschema in Abb. 88 wiedergegeben ist<sup>2</sup>. Kapazität und Verlustfaktor werden im Substitutionsverfahren aus zwei Brückeneinstellungen ermittelt. Es gilt

$$C_x = \text{const} (R_1' - R_1'') = C' - C''$$

$$G_x = \frac{R_3' - R_3''}{R_3' \cdot R_3''}$$

**Brücken mit phasenempfindlichen Indikatoren und selbsttätigem Abgleich, Kompensatoren.** Von den technischen Brückenordnungen, die die teils festen, teils veränderlichen Schaltelemente in geschickter Weise in einem Brückenkasten vereinen, führt die technische Entwicklung über die Brücken mit phasenempfindlichen Indikatoren zu den Brücken mit selbsttätigem Abgleich und den Kompensatoren.

Wird in einem Brückennullzweig ein phasenempfindlicher Indikator benutzt, so kann der Nullstrom der Brücke entsprechend dem Blindstrom und dem Verluststrom nach zwei zueinander senkrechten Stromvektoren abgeglichen werden. Wird die Brücke nur in bezug auf einen Vektor abgeglichen und die Größe des anderen Vektors, z. B. der Wirkkomponente am Ausschlag des Indikatorinstrumentes abgelesen, so bezeichnet man derartige Brücken als halbabgeglichene Brücken und verwendet sie für die direkte Anzeige von  $\text{tg } \delta$  und der Änderung von  $\text{tg } \delta$  mit einem Parameter, z. B. der Zeit, Temperatur u. a. Als Indikatoren werden die Schwingkontaktgleichrichter<sup>3</sup> der Firma Siemens & Halske benutzt.

<sup>1</sup> FORD, W. A. and S. I. REYNOLDS: Gen. Electr. Rev. Bd. 36 (1933) S. 99.

<sup>2</sup> HERBORN, L. E.: Bell Labor. Rec. Bd. 16 (1937) S. 91.

<sup>3</sup> KRÖNERT, J.: Z. techn. Phys. Bd. 14 (1933) S. 474 u. Arch. techn. Messen Z 540—1 bis 5.

Die Verlustwinkelmeßbrücke nach THAL<sup>1</sup> arbeitet nach einer derartigen Schaltung. Auch Trockengleichrichter lassen sich als phasenempfindliche Anzeigergeräte für Brückenschaltungen besonders bei höheren Frequenzen verwenden, wo sie den Schwinggleichrichtern aus mechanischen Gründen überlegen sind.

Eng verwandt mit den Brückenschaltungen sind die Kompensationsanordnungen<sup>2</sup>. Hier wird eine zu prüfende Spannung durch eine in bezug auf Größe und Phase regelbare Vergleichsspannung, die aus zwei hintereinander geschalteten, um  $90^\circ$  gegeneinander phasenverschobenen Teil-

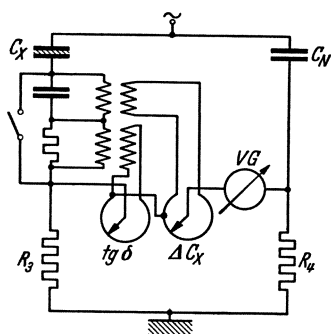


Abb. 89. Kompensationsschaltung in Verbindung mit der Schering-Brücke.

spannungen  $U_1$  und  $U_2$  zusammengesetzt ist, kompensiert, so daß im Kompensationskreis kein Strom fließt. Von den Brücken für Stromwandleruntersuchungen ist die Einführung einer Kompensationsspannung in den Galvanometerzweig bekannt. Bei den Verlustwinkelmeßbrücken wird diese Spannung einer Hilfsschaltung entnommen. Abb. 89 zeigt im Prinzip eine derartige Schaltung in Verbindung mit der Schering-Brücke, wobei der regelbare Kondensator  $C_4$  zum Abgleich des Verlustfaktors fehlt. In Reihe mit dem Prüfling  $C_x$  liegen ein Hilfskondensator und ein Wider-

stand. Die Spannungen am Kondensator und am Widerstand werden durch zwei Übertrager zwei Widerstandsschleifdrähten zugeführt, die in der Brückendiagonalen den Abgriff von zwei Hilfsspannungen gestatten. Die Brücke wird zunächst von Hand durch Regeln von  $R_3$  auf die Kapazität abgeglichen. Um die Brücke auch der Phase nach abzugleichen, wird in der Diagonalen die Hilfsspannung am Schleifdraht „ $\text{tg } \delta$ “ eingeführt. Tritt nun durch Erwärmung eine Änderung der zu messenden Kapazität ein, so wird sie nicht durch Veränderung des Widerstandes  $R_3$  kompensiert, sondern durch Einführung einer zweiten Gegenspannung, die gleichfalls über den Übertrager einem Raupenwiderstand „ $\Delta C_x$ “ entnommen wird. Als Nullinstrument zu dieser Brücke dient das bekannte Schering-Schmidtsche oder Rumpfsche Vibrationsgalvanometer. Der Vorteil dieser Anordnung ist, daß mit Hilfe der zusätzlichen Einrichtung zur Kompensation, die an jede vorhandene Schering-Brücke angeschlossen werden kann, die Änderung von  $C_x$  und  $\text{tg } \delta_x$  direkt abgelesen werden kann, daß ferner durch einen Kurzschließer die Hilfseinrichtung überbrückt und mit der einfachen Meßeinrichtung ihre Anzeige mit dem Vibrationsgalvanometer in der althergebrachten

<sup>1</sup> THAL: Arch. techn. Messen V 339—11 u. 13.

<sup>2</sup> Arch. techn. Messen J 94—1 bis J 94—13.



Weise jederzeit überwacht werden kann. Die Einrichtung wird von der Firma Siemens & Halske hergestellt.

Brücken mit selbsttätigem Abgleich<sup>1</sup>. Sofern die in der Meßdiagonalen auftretenden Spannungen durch zwei um  $90^\circ$  gegeneinander phasenverschobene Vergleichsspannungen durch Drehung des Abgriffes der Schleifdrähte  $\Delta C_x$  und  $\text{tg } \delta_x$  selbsttätig kompensiert werden, erhält man die idealste Wechselstrombrücke, die Brücke mit selbsttätigem Abgleich (s. Abb. 90). Für die Kompensation dienen Induktionsmeßwerke, die die Eigenschaften eines phasenabhängigen Nullindikators

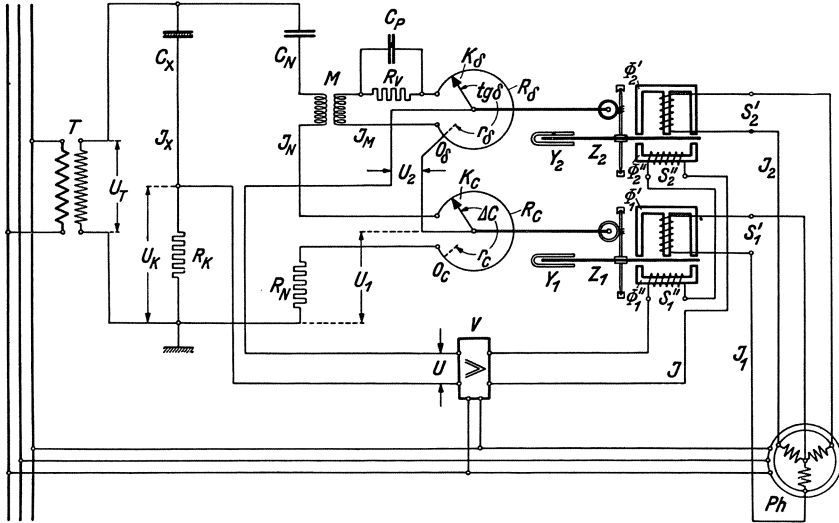


Abb. 90. Kompensationsschaltung mit selbsttätigem Abgleich.

besitzen und als Umkehrmotore zur Steuerung der gebräuchlichen Abgleichmittel, nämlich der Drehung eines Schleifkontaktes, benutzt werden können. Zur Abgleichung sowohl der Kapazitätsänderung wie des Verlustfaktors benötigt man je ein fremderregtes Meßwerk. Die zwei Meßwerke müssen zur Erzielung ausreichender Empfindlichkeit über einen gemeinsamen Röhrenverstärker  $V$  verbunden werden. Die beweglichen Glieder der Abgleichwiderstände, die Schleifkontakte, sind entweder mit den Zeigern von Anzeiginstrumenten oder mit Tintenschreibern mechanisch gekuppelt. Bei richtiger Phaseinstellung der Erregerfelder der Nullindikatoren besteht ein eindeutiger Zusammenhang zwischen der Drehrichtung der Zäblerscheiben der Meßwerke und der zum konvergenten Abgleich notwendigen Drehung der Schleifkontakte  $K_C$  und  $K_\delta$  in der

<sup>1</sup> GEYGER, W.: Arch. Elektrotechn. Bd. 29 (1935) S. 842 u. Bd. 31 (1937) S. 115; Arch. techn. Messen J 94—5 (Jan. 1936) u. J 924—1 (Aug. 1936); Arch. techn. Messen J 850—3 (Jan. 1939).



Abb. 91 a. Registrierende Verlustfaktormeinrichtung.

Weise, daß die Beeinflussung der Kompensationskontakte für den Abgriff der Kompensationsspannungen für  $\Delta C_x$  und  $\text{tg } \delta_x$  im Sinne der gewünschten Brückeneinstellung erfolgt. Der Betrieb dieser Brücken geht mithin so vor sich, daß die Anordnung zunächst hinsichtlich der Kapazität von Hand durch den Widerstand  $R_3$  so abgeglichen wird, daß der Schleifkontakt für die kapazitive Spannungskomponente auf den Punkt Null des Schleifdrahtes  $\Delta C_x$  einspielt. Am Schleifkontakt für die Verlustfaktorablesung tritt dabei bereits automatisch die Anzeige des Verlustfaktors für das Meßobjekt  $C_x$  auf. Wie bei dem Handbetrieb wird nunmehr automatisch eine Änderung von  $C_x$  oder von  $\text{tg } \delta_x$ , die durch Dauerbelastung oder durch Steigerung der Betriebsspannung hervorgerufen wird, durch die beiden Nullmotoren und die von ihnen gesteuerten Schleifkontakte so geregelt, daß der Nullzweig stromlos bleibt. Die Schreibfedern geben dabei eine Aufzeichnung der Kapazitäts-

änderung und des Verlustfaktors<sup>1</sup>. Die Einstellzeit der Schreibfedern beträgt etwa 1 bis 2 s. Die Genauigkeit dieser Anordnung entspricht ungefähr der Genauigkeit der üblichen Schering-Brücke. Die vollselbsttätige Abgleichung von Verlustwinkelmeßbrücken dürfte für die laufende Prüfung von Isolierstoffen wie auch von Kapazitäten, Kabeln und Hochspannungsapparaten große Bedeutung haben. Die technische Ausführung zeigt Abb. 91a und b<sup>2</sup>.

Eine eingehendere Beschreibung der Kompensationsverfahren unterbleibt, da derartige Einrichtungen im allgemeinen nicht wie die Brücken-

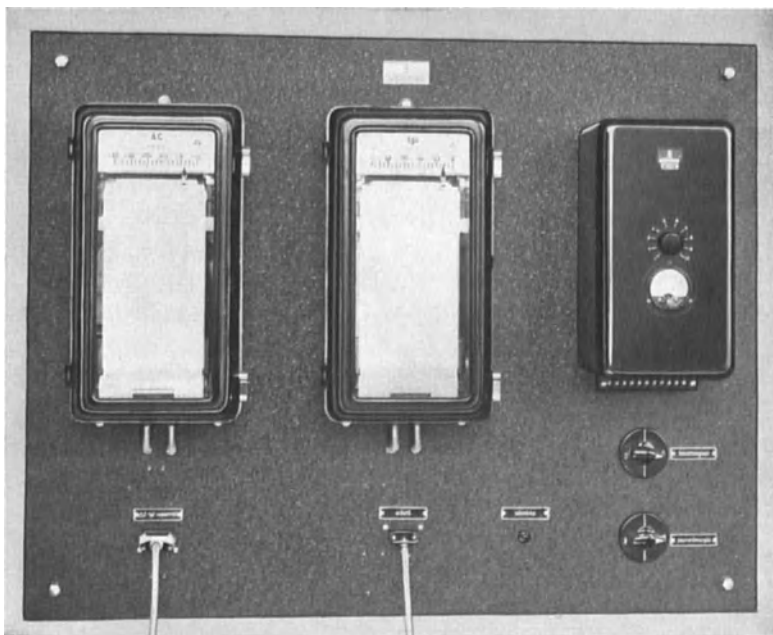


Abb. 91b. C-tgδ-Schreiber und Verstärker für die Siemens-Brücke mit selbsttätigem Abgleich.

schaltungen im Laboratorium selbst zusammengestellt werden, sondern als fertige Gebrauchseinrichtungen von der Herstellerfirma bezogen werden.

**Sonstige Verfahren für Verlustfaktormessungen.** Gegenüber den beschriebenen Brücken und Kompensationsverfahren für Verlustfaktormessungen an Isolierstoffen bei Frequenzen bis etwa 10000 Hz treten alle übrigen weit zurück. Sie seien deshalb nur kurz aufgezählt:

1. Ermittlung des Verlustfaktors aus Leistungsmessungen. Aus Strom, Spannung und der im Isolierstoff verbrauchten Leistung  $N = U \cdot I \cdot \cos \varphi$

<sup>1</sup> GEYGER, W.: Arch. Elektrotechn. Bd. 31 (1937) S. 115.

<sup>2</sup> Eine zusammenfassende Darstellung dieser Siemens-Brückeneinrichtung ist von H. POLECK: Wiss. Veröff. Siemens-Werk Bd. 18 (1939) S. 9 u. Arch. techn. Messen J 921—15 (Nov. 1939) gegeben.

läßt sich  $\text{tg } \delta$  errechnen. Das Verfahren erfordert einen hochempfindlichen Leistungsmesser, der für große Ladeströme geeignet ist<sup>1</sup>. Als Leistungsmesser hat das Elektrometer Verwendung gefunden<sup>2</sup>. Das Thermowattmeter nach FISCHER<sup>3</sup> wird für die Messung kleiner Leistungen bei großen Phasenverschiebungen von der Firma Kipp & Zonen, Delft, hergestellt. Es gestattet die laufende Registrierung der Leistung in Abhängigkeit von der Temperatur, Zeit, Frequenz u. a.

2. Ermittlung des Verlustfaktors aus Temperaturmessungen (kalorimetrisches Meßverfahren). Die im Isolierstoff verbrauchte Verlustleistung wird in Wärme umgesetzt. Die Messung der Wärmemenge des Stromes und der Spannung ermöglicht die Bestimmung von  $\text{tg } \delta^4$ . Das Verfahren ist für die Messung größerer Verlustleistungen anwendbar und z. B. für die Prüfung von großen Kondensatorenbatterien zu einem technischen Prüfverfahren ausgebildet worden. Der kalorimetrischen Methode kommt ferner bei Hochfrequenz Bedeutung zu<sup>5</sup>.

#### Untersuchungen von Isolierstoffen bei Hochfrequenz<sup>6,7</sup>.

Die genannten Brückenverfahren sind unter Vorsichtsmaßnahmen wie Abschirmung<sup>8</sup>, Beseitigung der Körperkapazität des Beobachters u. a. auch bei Hochfrequenz für die Messung des dielektrischen Verlust-

<sup>1</sup> HÖCHSTÄDTER: ETZ Bd. 31 (1910) S. 467. — SPIELHAGEN: Arch. Elektrotechn. Bd. 23 (1930) S. 609; SKIRL: Wechselstromleistungsmessungen. Berlin: Julius Springer 1930; ferner ROTH: Hochspannungstechnik. Berlin: Julius Springer 1937; ferner EMANUELI u. BARBAGELATA: Elettrotecnica Bd. 26 (1922) S. 477.

<sup>2</sup> PETERSEN: Hochspannungstechnik. Stuttgart: Ferdinand Enke 1911; ferner RAYNER, STANDRING u. a.: J. Inst. electr. Engrs. Bd. 68 (1930) S. 1132.

<sup>3</sup> FISCHER: Theorie der thermischen Meßgeräte der Elektrotechnik. Stuttgart: Ferdinand Enke 1931. — BADER: Arch. Elektrotechn. Bd. 29 (1935) S. 809; ETZ Bd. 56 (1935) S. 889. — ZICKNER, G. u. G. PFESTORF: Thermowattmetrische Verlustmessungen an großen Kapazitäten. ETZ Bd. 51 (1930) S. 1681.

<sup>4</sup> SCOTT, J. A., H. W. BOUSMAN u. R. R. BENEDICT: J. Amer. Inst. electr. Engng. Bd. 47 (1928) S. 361.

BECK, H.: Über die dielektrischen Verluste von Isolierölen bei sehr hohen Frequenzen. Phys. Z. Bd. 34 (1933) S. 721.

<sup>5</sup> VÖGLER, H.: s. Elektr. Nachr.-Techn. Bd. 8 (1931) S. 197, hat das kalorimetrische Meßverfahren bei  $3 \cdot 10^6$  bis  $1,3 \cdot 10^7$  Hz zur Untersuchung von Paraffin- und Transformatorenöl sowie Terpentin und m-Xylol angewandt.

RACE, H. H. and S. C. LEONHARD: Electr. Engng. Bd. 55 (1936) S. 1347. Kalorimetrische Messungen bei  $10^6$  Hz an Quarz, Pyrexglas, Hartgummi und Isolantite; ferner

MACGREGOR-MORRIS, J. T. u. G. L. GRISDALE: Phil. Mag. (7) Bd. 28 (1939) S. 34. Kalorimetrische Messungen an Zelluloseazetat, Mycalex, Trolitul und Bakelit in Abhängigkeit von der Temperatur und Frequenz.

<sup>6</sup> ANDERSON, W.: Phil. Mag. Bd. 13 (1932) S. 986.

<sup>7</sup> Eine Zusammenstellung der dielektrischen Verlustfaktoren üblicher Isolierstoffe findet sich bei H. IRINO, Circ. electr. Labor. Tokyo 1931 Nr. 80.

<sup>8</sup> FERGUSON, J. G.: Bell Syst. techn. J. Bd. 8 (1929) S. 560.

faktors und der Kapazität anwendbar<sup>1</sup>. Bei Frequenzen von etwa 20000 Hz ab ist das sog. Resonanzverfahren leichter zu handhaben und gestattet die Messung in einem sehr großen Frequenzbereich ( $10^4$  bis  $10^8$  Hz). Das Verfahren beruht auf der Erregung eines Schwingungskreises durch Änderung der Größen  $\omega$ ,  $L$  oder  $C$  zur Resonanz, die an der Maximalerregung eines Detektorkreises oder eines Röhrenvoltmeters festgestellt werden kann. Im Schwingungskreis befindet sich der zu messende unbekannte Kondensator. Die Hauptschwierigkeiten der Messung liegen in der Unbestimmtheit und den Fehlern der Normalien in bezug auf ihre Größe und ihren Verlustfaktor bei Hochfrequenz<sup>2</sup> und ihre gegenseitige Beeinflussung.

Nach dem von ROHDE und SCHLEGELMILCH<sup>3</sup> benutzten Verfahren wird der Verlustkondensator durch einen verlustfreien Kondensator, zu dem ein Ohmscher Widerstand in Reihe geschaltet werden kann, in Substitutionsschaltung ersetzt. Das Meßgerät (Abb. 92) besteht aus einem Sendeteil mit der Röhre I und einem Empfangsteil mit der Röhre II. Im Sendeteil wird durch induktive Rückkopplung mit der Spule  $L_1$  ein hochfrequenter Wechselstrom erzeugt, von dem ein Teil von  $L_2$  auf die Spule  $L_3$  durch induktive Kopplung übertragen wird. Die induzierende Energie läßt sich durch Veränderung des Kopplungsgrades beliebig regeln. Dazu ist  $L_2$  in eine Aluminiumkapsel eingebaut, durch deren Drehung die Kopplung verändert wird. Nach den Angaben von ROHDE ist in der Kapsel die Spule  $L_3$  mit eingebaut und durch einen Satz von Spulen in entsprechenden Aluminiumkapseln zusammen mit zugehörigen Spulen  $L_3$  die Frequenz in einem Bereich von  $10^5$  bis  $10^7$  Hz regelbar. Der Kondensator  $C_x$  oder ein Normalkondensator  $C_n$  bilden zusammen mit  $L_3$  den Schwingungskreis des Empfangsteiles. Um die Frequenz des Meßkreises beliebig zu wählen, liegt parallel zu  $L_3$

<sup>1</sup> DYE, D. W. and T. I. JONES: J. Instn. electr. Engrs. Bd. 72 (1933) S. 169. ferner Radio-frequency bridge der General Radio Co., Cambridge A, Mass; ferner S. I. REYNOLDS and H. H. RACE: Gen. Electr. Rev. Bd. 41 (1938) S. 529. — Eine vollständig abgeschirmte Hochfrequenzmeßbrücke ist in der Abb. 79 wiedergegeben, wobei der unbekannte Kondensator  $C_x$  dem Kondensator  $C_2$  parallel zu schalten ist. Zweckmäßige Werte für die Brückenzeige sind  $R_3 = R_4 = 100 \Omega$  für 500 bis 2000 kHz,  $1000 \Omega$  für 50 bis 500 kHz,  $R_1 = 111,1 \Omega$  regelbar (induktivitäts- und kapazitätsfrei),  $C_1 C_2$  Normalkondensatoren, etwa 500 pF; Wagner-scher Hilfszweig: 2 Widerstände je  $1000 \Omega$  mit  $6 \Omega$  Abgleichwiderstand in der Mitte. Es ist  $C_x = C_2 - C'_2$ ;  $R_s = R_1 - R'_2$ ;  $\text{tg } \delta = \left( \frac{C_2}{C_2 - C'_2} \right) R_2 \omega C_2$ . Eine Zweiphasenbrücke beschreibt H. GROSS u. J. HAUSSE: Ann. Phys., Lpz. Bd. 24 (1935) S. 127.

<sup>2</sup> Siehe dazu auch das Buch „Hochfrequenz-Meßtechnik“ von O. ZINKE. Leipzig 1938.

<sup>3</sup> RHODE, L. u. W. SCHLEGELMILCH: Verlustfaktormessungen bei Hochfrequenz. ETZ Bd. 54 (1933) S. 580; Arch techn. Messen V 3447—2 (Mai 1935); ferner L. ROHDE u. H. SCHWARZ: Hochfrequenztechn. Bd. 43 (1934) S. 156.

ein mit Feineinstellung versehener Drehkondensator, der nicht verlustfrei zu sein braucht. Größere Verluste beeinträchtigen jedoch die Empfindlichkeit der Meßanordnung. Der Drehkondensator wird so eingestellt, daß seine Kapazität zusammen mit  $C_x$  gerade die Kapazität ergibt, die mit der Spule  $L_3$  einen Schwingungskreis von der gewünschten Eigenfrequenz liefert. Als Resonanzanzeiger dient ein Röhrenvoltmeter. Durch einen Spannungsteiler kann die Gittervorspannung zwischen 0 und  $-100\text{ V}$  verändert werden. Das Milliampereometer  $M$  liegt im Anodenkreis und dient zur Messung des Anodenstromes. Für die

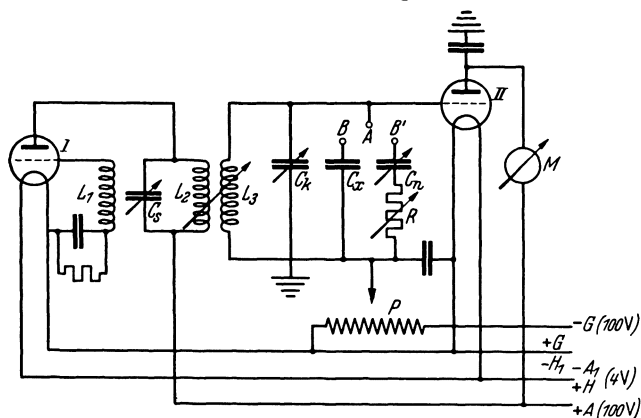


Abb. 92. Anordnung zur Messung der Verluste bei Hochfrequenz nach ROHDE und SCHLEGELMILCH.

Messung verbindet man zuerst  $A$  mit  $B$  (Abb. 88). Darauf wird der Sendekreis auf die gewünschte Frequenz eingestellt und der Drehkondensator so eingeregelt, daß  $M$  den maximalen Ausschlag anzeigt. Man hat dann Resonanz des Schwingungskreises 2 mit dem Sendeteil 1. Der vom Milliampereometer angezeigte Wert wird notiert. Nun löst man die Verbindung von  $A$  mit  $B$  und schließt dafür  $B'$  an  $A$  an. Der winkelfehlerfreie Widerstand  $R$  wird zunächst auf 0 gestellt und der verlustfreie Kondensator  $C_n$  so eingeregelt, daß das Milliampereometer wieder den größten Ausschlag ergibt. Da die Einstellung des Sendeteiles nicht verändert wurde, ist die Kapazität  $C_n$  gleich der Kapazität  $C_x$ . Der Ausschlag des Milliampereometers ist allerdings größer, da der Normalkondensator  $C_n$  verlustfrei ist. Es wird deshalb der Widerstand  $R$  in Reihe mit dem Normalkondensator so lange vergrößert, bis der Ausschlag des Milliampereometers auf den alten Wert zurückgeht. Der Verlustfaktor ergibt sich dann zu

$$\operatorname{tg} \delta = \omega R C_n.$$

Wird  $C$  in cm oder pF,  $R$  in  $\Omega$  gemessen und ist der Sender in m Wellenlängen geeicht, so gilt

$$\operatorname{tg} \delta = 2 \pi c \cdot \frac{R \cdot C_{(\text{cm})}}{\lambda} = 2 \pi c \cdot \frac{R \cdot C_{(\text{pF})}}{\lambda} \cdot 1,11;$$

für  $C$  in pF,  $R$  in Ohm und die Frequenz des Senders in Hz gilt

$$\operatorname{tg} \delta = 2 \pi f \cdot R C_{(\text{pF})}.$$

Zur Erhöhung der Einstellempfindlichkeit sind die Werte  $C_N$  und  $R$  zu interpolieren. Die Genauigkeit der Verlustfaktormessung ist vorwiegend durch die Werte von  $R$  gegeben, und zwar bestimmt durch die Änderung von  $R$ , die gerade noch eine merkliche Änderung des Galvanometerausschlages hervorruft. Die Relativgenauigkeit der Kapazitätsmessungen beträgt etwa 1 bis 2%, die absolute Genauigkeit ist wegen der Kapazität



Abb. 93. Dielektrische Verlustfaktormeinrichtung für Hochfrequenz nach ROHDE und SCHLEGELMILCH.

der Zuleitungen im allgemeinen geringer. Bei großen Verlustfaktoren wird die Resonanzkurve des Empfangsteiles flach, was die Bestimmung von  $C$  und  $\lambda$  ungenauer macht. Für die Genauigkeit der Verlustfaktormessung wird daher ein Wert von 5% genannt. Bei sehr kleinen Verlustfaktoren wird diese Genauigkeit nicht mehr erreicht. Die Absolutgenauigkeit beträgt bei 300 m Wellenlänge  $0,2 \cdot 10^{-4}$  und wird bei kürzeren Wellen ungünstiger<sup>1</sup>. Das Gerät, Abb. 93, wird von den Firmen Siemens & Halske<sup>2</sup>, Berlin, und dem Physikalisch-technischen Entwicklungslabor Dr. ROHDE und Dr. SCHWARZ, München 9, hergestellt.

Statt Widerstand und Kapazität eines Schwingungskreises zu ändern, kann die Messung des dielektrischen Verlustfaktors und der Kapazität bei Hochfrequenz nach dem Verstimmungsverfahren<sup>3</sup>, siehe dazu S. 98, durchgeführt werden. Die Verstimmung kann durch Änderung der

<sup>1</sup> Über Fehler durch das Substitutionsverfahren s. TAKEO AKAHIRA, MASAO KAMAZAWA u. YOSHITADA NAKAJIMA: Sci. Pap. Inst. pays. Chem. Res., Tokyo Bd. 34 (1938) Nr. 750/753.

<sup>2</sup> Beschreibung der Siemens-Hochfrequenzmeßgeräte s. bei JAUMANN: ETZ Bd. 52 (1931) S. 985.

<sup>3</sup> ZINKE, O.: Hochfrequenztechn. u. Elektroakustik Bd. 47 (1936) S. 196.

Frequenz, der Selbstinduktion oder der Kapazität erfolgen. Das Verfahren nach HARTSHORN<sup>1</sup>, Verstimmung durch Kapazitätsänderung, hat den Vorteil, daß die Einstellungen frequenzunabhängig sind, d. h. eine Eichung des Gerätes ist für den ganzen Frequenzbereich gültig. Außerdem besteht der Meßkreis nur aus *parallel* geschalteten Elementen. Dadurch entfallen Fehler durch ungleiche Stromverteilung bei Hochfrequenz, und die Abschirmung wird besonders übersichtlich. Die Anordnung ist schematisch in Abb. 94 gezeichnet. Kreis I ist der Röhrengenerator, der induktiv über eine Selbstinduktion  $L$  und den Widerstand  $R$  mit dem Meßkreis II gekoppelt ist.  $C_1$  ist der unbekannte Kondensator mit dem zu prüfenden Dielektrikum und der Ableitung  $G$ ,  $C_2$  ein Präzisions-Luftkondensator,  $V$

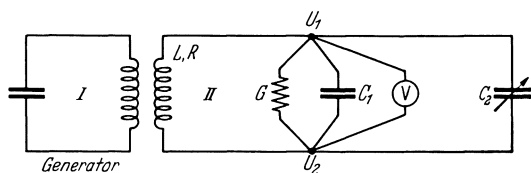


Abb. 94. Dielektrische Hochfrequenzmeßeinrichtung nach HARTSHORN.

ein Voltmeter. Die Stromverteilung in einem derartigen Netzwerk ist wegen der verteilten Kapazitäten unübersichtlich. Kopp lungsspule, Kapazitäten und Voltmeter sind daher

gegeneinander abgeschirmt und ihre Abschirmungen mit dem Punkte  $U_2$  verbunden. Für die Prüfung wird die Spannung an den Punkten  $U_1 U_2$  ermittelt, die allen Schaltelementen des Kreises gemeinsam angehören und dadurch das Problem vereinfachen. Abb. 95 zeigt die technische Anordnung mit Röhrevoltmeter. Die Kapazitäten  $C_1$  und  $C_2$  sind durch Mikrometerschrauben  $M_1$  und  $M_2$  regelbar.  $C_2$  ist ein Zylinderkondensator. In eine zylindrische Bohrung wird mit der Mikrometerschraube  $M_2$  ein zweiter Zylinder eingeführt. Der Kapazitätsbereich beträgt etwa 10 pF bei einer Mikrometerverstellung um 25 mm. Änderungen von 0,005 pF können sicher abgelesen werden.  $C_1$  ist ein Plattenkondensator, in den der Prüfling eingelegt wird. Die obere Platte ist durch einen Metallschlauch mit der Kappe  $H$  verbunden, um die Mikrometerschraube stromlos zu machen. Die Betätigung der Mikrometerschrauben erfolgt durch etwa 2 m lange Holzstäbe, um eine Beeinflussung der Anordnung durch die Kapazität des Beobachters zu vermeiden. Das Röhrevoltmeter (s. Abb. 96) besteht aus einer Brückenschaltung in deren Nullzweig das Anzeigegerät angeschlossen ist<sup>2</sup>. Der Meßkreis wird zunächst durch Regeln von  $C_1$  auf Resonanz abgestimmt. Dann wird die zu unter-

<sup>1</sup> HARTSHORN, L.: J. Instn. Engrs. Bd. 79 (1936) S. 597. Mit geringen Änderungen ist das gleiche Verfahren von OHTAKA SHOEMENA: Nippon Electr. Comm. Engng. 1937 S. 75 angewendet worden. Ähnliche Anordnungen wurden früher angewandt von R. LINDEMANN: Verh. dtsh. phys. Ges. Bd. 11 (1909) S. 28; ferner RAUSCH v. TRAUBENBERG u. MONASCH: Phys. Z. Bd. 8 (1907) S. 925; H. BRANDER: Ann. Phys., Lpz. Bd. 22 (1907) S. 640; R. H. RENDAHL: Phys. Z. Bd. 9 (1908) S. 135.

<sup>2</sup> Siehe auch Arch. techn. Messen J 8335 (Sept. 1938).



suchende Probe zwischen die Platten des Kondensators  $C_1$  eingebracht (die Probe soll den Kondensator ganz füllen) und die Frequenz geregelt, bis Resonanz bei einer geeigneten Stellung des Kondensators  $C_2$  eintritt. Sollen die Messungen bei einer vorher bestimmten Frequenz ausgeführt werden, so ist ein Hilfskondensator dem Prüfling parallel zu schalten oder eine veränderliche Selbstinduktion für die Einstellung der Resonanz zu

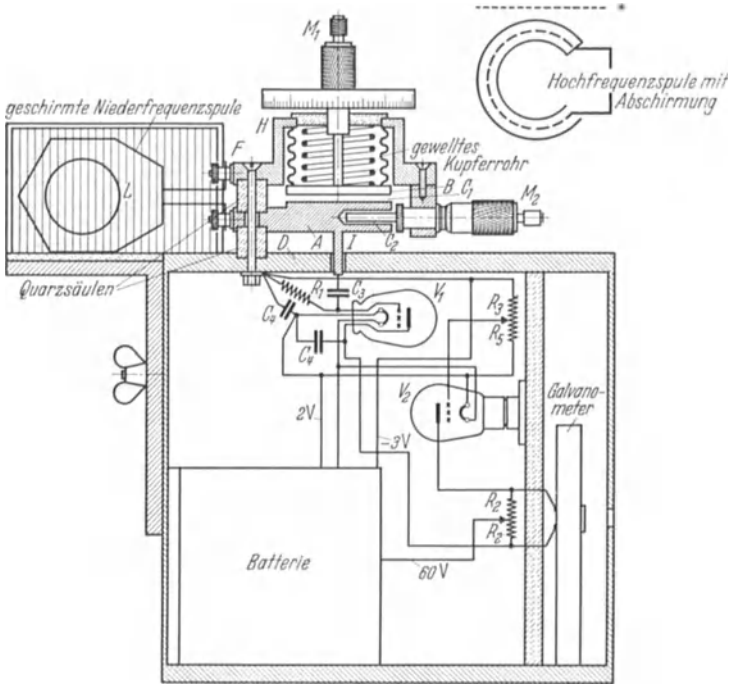


Abb. 95. Anordnung der Hochfrequenzmeßeinrichtung nach HARTSHORN.

benutzen. Die Maximalablesung am Röhrenvoltmeter sei  $\alpha_1$ . Der Prüfling wird sodann aus dem Kondensator entfernt und die Kapazität so lange vergrößert, bis wiederum Resonanz auftritt. Wenn  $C_x$  die Kapazität von  $C_1$  mit dem Prüfling ist und  $C_0$  die Leerkapazität von  $C_1$  nach Wiederherstellung der Resonanz, so ist  $C_x = C_0 = \frac{F}{3,6\pi \cdot a}$ . Der Abstand  $a$  kann im vorliegenden Falle am Mikrometer direkt abgelesen werden.

Für die Ermittlung des dielektrischen Verlustfaktors<sup>1</sup> des Prüflings ist folgender Meßgang notwendig. Der Schwingungskreis ist mit dem Prüfling  $C_x$  auf Resonanz abgestimmt. Der Kondensator  $C_2$  wird dann so geregelt, daß der Ausschlag des Voltmeters  $\alpha_1$  auf den Aus-

<sup>1</sup> Über Dämpfungsmessungen s. auch PAULI: Z. Phys. Bd. 5 (1921) S. 376 u. Bd. 6 (1921) S. 118.

schlag  $\alpha_1/\sqrt{2}$  zurückgeht. Wegen der Symmetrie der Resonanzkurve ist dies bei 2 Werten  $C'_2$  und  $C''_2$  möglich. Die Differenz sei  $\Delta C_x$ . In gleicher Weise wird ein zweiter Wert  $\Delta C_x$  ermittelt, für den der Ausschlag am Röhrevoltmeter  $\alpha_1/2$  beträgt. Die gleichen Einstellungen werden wiederholt, nachdem statt des Prüflings der Kondensator  $C_1$  mit Luft als Dielektrikum so eingestellt ist, daß Resonanz im Schwingungskreis herrscht. Es mögen sich 2 Kapazitätsdifferenzen  $\Delta C_0$  entsprechend den Einstellungen  $\alpha_1/\sqrt{2}$  und  $\alpha_1/2$  ergeben. Aus der Theorie, vgl. dazu S. 99, folgt aus diesen Werten für den dielektrischen Verlustfaktor

$$\operatorname{tg} \delta_x = \frac{G}{\omega C_x} = \frac{\Delta C_x - \Delta C_0}{2 C_x} \text{ für Werte } \Delta C_x \text{ und } \Delta C_0 \text{ entsprechend } = \frac{\alpha_1}{\sqrt{2}}$$

$$\operatorname{tg} \delta_x = \frac{G}{\omega C_x} = \frac{\Delta C_x - \Delta C_0}{2 C_x \sqrt{3}} \text{ für Werte } \Delta C_x \text{ und } \Delta C_0 \text{ entsprechend } = \frac{\alpha_1}{2}.$$

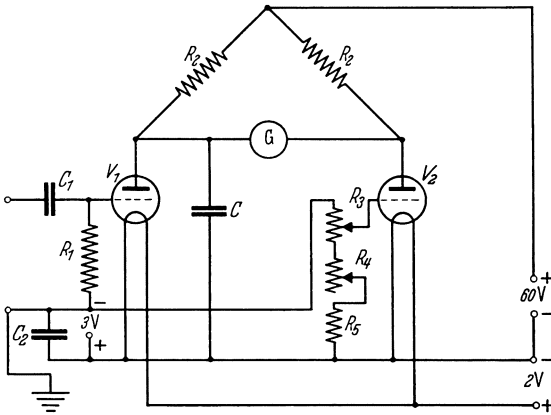


Abb. 96. Röhrevoltmeter nach HARTSHORN.

verzichtet und aus der Resonanzeinstellung bei eingeschaltetem und nichteingeschaltetem Dielektrikum der dielektrische Verlustfaktor nach folgender Gleichung errechnet werden:

$$\operatorname{tg} \delta_x = \frac{\sqrt{\frac{\alpha_0}{\alpha_1}} - 1}{C_s} \frac{\Delta C_0}{2 \sqrt{\frac{V_r^2}{V^2} - 1}}.$$

Es bedeuten:

$C_s$  Kapazität des Prüflings;  $\Delta C_0$  Differenz der Kapazität  $C_2$  bei nichteingeschaltetem Prüfling und Verstimmung des Resonanzkreises auf  $\alpha/\sqrt{2}$ ;  $\alpha_0/\alpha_1$  Verhältnis der Resonanzeinstellungen des Anzeigegeräts bei nicht eingeschaltetem und bei eingeschaltetem Prüfling.

Dadurch gestattet das Verfahren eine Prüfung der Messung nach zwei verschiedenen Wegen. Über Korrekturen zu der Methode siehe L. HARTSHORN (s. S. 144).

Die aus den Einstellungen  $\alpha_1/\sqrt{2}$  und  $\alpha_1/2$  ermittelten Werte von  $\operatorname{tg} \delta_x$  stimmen auch bei kleinen Verlustfaktoren auf 1% überein. Einige Meßergebnisse, die nach diesem Verfahren ermittelt wurden, sind in der Tabelle 13 (S. 147) wiedergegeben.

Bei bekanntem Normalkondensator kann auf die Einstellung der 2 Kapazitätsdifferenzen

Tabelle 13.

Isolierstoff	Frequenz (MHz)	Dielektrischer Verlustfaktor $\operatorname{tg}\delta$	Dielektrizitätskonstante
Keramischer Werkstoff I . . . . .	15	0,007 <sub>1</sub>	5,6
	3	0,016 <sub>6</sub>	5,7
	1,5	0,023	5,7 <sub>5</sub>
	1	0,028	5,7 <sub>5</sub>
Keramischer Werkstoff II . . . . .	50	0,0008	6,1
	10	0,0009	6,1
	3	0,0010	6,1
	1,5	0,0010	6,1
	1	0,0012	6,2
Keramischer Werkstoff III. . . . .	100	0,0010	5,7
	50	0,0016	5,7
	12	0,0019	5,7
	3	0,0028	5,7
	1	0,0042	5,7
Kunstharz . . . . .	100	0,026	4,6
	50	0,025	4,6
	12	0,025	4,6
	3	0,024	4,6
	1	0,024	4,8
Geschmolzener Quarz . . . . .	50	0,0001 <sub>6</sub>	3,7 <sub>7</sub>
	12	0,0002 <sub>3</sub>	3,7 <sub>7</sub>
	1	0,0002 <sub>5</sub>	3,7 <sub>7</sub>

Die gleichen theoretischen Erwägungen mit einer Resonanzbrücke stellte W. HERZOG an<sup>1</sup>. Eine technische Einrichtung für die Messung kleiner Verluste von Hochfrequenzschwingungskreisen im Bereich von 50000 bis 10 Millionen Hz wird von A. AGRICOLA<sup>2</sup> beschrieben. Der Verlustwinkel ist dabei in Prozenten an der Einstellung des Meßkondensators direkt ablesbar. Das Gerät für Netzanschluß enthält einen Meßsender, ein Röhrenvoltmeter und einen Wellenmesser<sup>3</sup>.

**Bestimmung der Kapazität und der Dielektrizitätskonstanten aus der Länge elektrischer Wellen (vorwiegend für Flüssigkeiten bei sehr hohen Frequenzen, Wellenlänge etwa 1 m).** Bestimmt man die Länge der auf einer Doppeldrahtleitung stehenden, möglichst homogenen HERTZschen Wellen sowohl in Luft ( $\lambda_0$ ) wie im Dielektrikum ( $\lambda$ ), so ergibt sich<sup>4</sup>

<sup>1</sup> HERZOG, W.: Über ein neues Verfahren zur Messung des Verlustwinkels von Kapazitäten bei Ton- und Hochfrequenz. *Telegr., Fernsprech-, Funk- u. Fernsehtchn.* Bd. 27 (1937) S. 99.

<sup>2</sup> AGRICOLA, A.: *Hochfrequenztechn.* Bd. 51 (1938) S. 77.

<sup>3</sup> Ähnliche Einrichtungen siehe M. BOELLA, *Elettrotecnica* Bd. 19 (1932) S. 99 ferner O. ZINKE: Ein Meßgeräat zur direkten Messung der Güte und Verlustzahl von Schwingkreisen. *Z. Hochfrequenztechn.* Bd. 47 (1936) S. 196.

<sup>4</sup> DRUDE, P.: *Ann. Phys., Lpz.* Bd. 8 (1902) S. 336; Bd. 16 (1905) S. 116.

$\varepsilon = (\lambda_0/\lambda)^2$ . Für die Kapazität  $C$  eines Kondensators, der sich in einem LECHERSchen System<sup>1</sup> zwischen 2 Brücken in den Abständen  $x_1$  und  $x_2$  von diesen befindet, gilt<sup>2</sup>

$$\frac{4\pi}{\lambda'} C \lg \frac{d}{R} = \cotg \frac{\pi x_1}{\lambda'} + \cotg \frac{\pi x_2}{\lambda'},$$

wo  $d$  den Abstand und  $R$  den Halbmesser der Paralleldrähte und  $\lambda'$  die halbe Wellenlänge der Schwingungen im System bezeichnen. Von H. SLÄTIS<sup>3</sup> wird die Gleichung durch die Form

$$\frac{4\pi}{\lambda'} \left[ C + \frac{\vartheta}{2 \lg \frac{d}{R}} \right] \lg \frac{d}{R} = \cotg \frac{\pi(x_1 - \vartheta)}{\lambda'} + \cotg \frac{\pi(x_2 - \vartheta)}{\lambda'}$$

ersetzt, und dadurch werden die in den Zuleitungen des Kondensators induzierten Wirbelströme berücksichtigt. Dabei ist

$$\vartheta = \frac{L_{12}^2}{L_{22} 4 \lg \frac{d}{R}}$$

und  $L_{22}$  der Selbstinduktionskoeffizient der Wirbelstrombahn in dem einen Zuleitungsdraht,  $L_{12}$  der Gegeninduktionskoeffizient dieser Strombahn und des zugehörigen Lecher-Drahtes<sup>4</sup>.

**Bestimmung der Dielektrizitätskonstanten bei Hochfrequenz.** Außer den Verfahren nach S. 140f. gibt es für die Ermittlung der Dielektrizitätskonstanten bei Hochfrequenz technische Einrichtungen. Die eine arbeitet nach dem Prinzip der Überlagerungsmethode<sup>5</sup>. Zwei Sender  $K_1$  und  $K_2$  schwingen mit den Schwingungszahlen  $\nu_1$  und  $\nu_2$ .  $K_1$  hat eine feste Schwingungszahl, die meist in der Gegend von  $10^6$  Hz liegt. Der Sender  $K_2$  hat dagegen eine veränderliche Schwingungszahl gleicher Größenordnung.  $K_1$  und  $K_2$  sind sehr locker gekoppelt. Die Überlagerung beider Schwingungen liefert den Differenzton. Wenn man die Schwingungszahl des Senders  $K_1$  stetig von kleinen Werten her durch Änderung z. B. eines Kondensators vergrößert, so nimmt die Tonhöhe des Differenz-

<sup>1</sup> LINHART, H.: Über die Prüfung von Elektrolyt-Kondensatoren mit dem Lecher-System siehe z. B. M. V. PIRIE: Wireless Wld. Bd. 41 (1938) S. 326.

<sup>2</sup> MORTON, W. B.: Phil. Mag. Bd. 43 (1897) S. 383. — DRUDE, P.: Wied. Ann. Bd. 61 (1897) S. 466. — COOLIDGE, W. D.: Wied. Ann. Bd. 69 (1899) S. 125. — POTAPENKO, G.: Z. Phys. Bd. 20 (1923) S. 21. — LINNITSCHENKO, N.: Phys. Z. Bd. 14 (1913) S. 543. — ROMANOW, W. I.: Phys. Z. Sowjet Bd. 9 (1936) S. 362.

<sup>3</sup> SLÄTIS, H.: Ann. Phys., Lpz. (5) Bd. 32 (1938) S. 734.

<sup>4</sup> Ein neues Verfahren zur Bestimmung der Eigenschaften der Dielektrika bei Zentimeterwellen beschreibt M. VELASCO u. G. L. HUTCHINSON: Proc. phys. Soc., Lond. Bd. 51/4 (1939) S. 689; ferner G. BÄZ: Phys. Z. Bd. 40 (1939) S. 394; aus der Messung des Durchlässigkeits- und Reflexionsvermögens bei verschiedenen Schichtdicken wird Brechungsindex  $n$  und Absorptionsindex  $\kappa$  bestimmt (vgl. dazu S. 100, Ziffer 9) und der Verlustfaktor von Quarzglas, Trolitul, Hartgummi, Porzellan u. a. errechnet.

<sup>5</sup> EBERT: Z. phys. Chem. Abt. B Bd. 1 (1928) S. 101; ferner K. L. WOLF u. W. J. GROSS: Z. phys. Chem. Abt. B Bd. 14 (1931) S. 305.

tones ab, um bei tiefen Tönen schließlich ganz zu verschwinden. Die Schwingungszahl des Senders, bei der nach der Schweigezone das erste Geräusch als Differenzton wahrnehmbar ist, ist für eine Einstellung genau reproduzierbar und entspricht einer bestimmten Gesamtkapazität  $C$  des Senders  $K_2$ . Wird diese Kapazität dadurch geändert, daß ein Leerkondensator  $C_0$  mit einem Dielektrikum gefüllt wird, so muß die Gesamtkapazität durch Regeln eines Parallelkondensators wieder auf den alten Wert gebracht werden. Verwendet man in der technischen Ausführung eine bestimmte Meßzelle, deren Wert  $C_0$  durch ihren Aufbau gegeben ist, so entspricht jedem Wert von  $\epsilon$  eine bestimmte Änderung der Kapazität des Parallelkondensators, der somit direkt in Werten von  $\epsilon$  geeicht werden kann. Durch die Wahl verschiedener Meßzellen lassen sich verschiedene Meßbereiche der Dielektrizitätskonstanten herausgreifen. Die Eichung des Gerätes erfolgt im allgemeinen durch Füllen des Meßkondensators mit geeigneten, reinen Flüssigkeiten, deren Dielektrizitätskonstanten bekannt sind. Es können Dielektrizitätskonstanten von  $\epsilon = 2,2$  bis 80 gemessen werden. Das Gerät (Dielkometer) wird von der Firma Haardt & Co., Düsseldorf, Reichsstr. 37/39, hergestellt. Für die Füllung der Meßzellen wird ein zyklischer Äther von der Form  $O(C_2H_4)_2O$  (Dioxan) benutzt. In besonderem Reinheitsgrad (Exluan 0,05 und 0,6, 97 bzw. 99,6% Dioxangehalt) besitzt es eine Dielektrizitätskonstante von 2,26 bzw. 2,23<sup>1</sup>. Eine andere Einrichtung besteht aus einem Hochfrequenz-Schwingungskreis, dessen Frequenz ebenfalls durch einen Piezoquarz konstant gehalten wird. Wird in diesem Schwingungskreis die Kapazität erhöht, so nimmt der Anodenstrom anfänglich sehr langsam und dann schneller ab, bis ein Minimum erreicht worden ist. Bei einer weiteren Erhöhung der Kapazität steigt der Anodenstrom sehr schnell. Dieser Punkt wird für die Festlegung der Kapazität des Schwingungskreises benutzt. Schaltet man 2 Kondensatoren parallel in den Kreis ein, von denen der eine als Meßkondensator zum Aufnehmen der zu untersuchenden Substanz eingerichtet ist und der andere dazu dient, die Gesamtkapazität auf einem konstanten Wert zu halten, so ist wie bei der Überlagerungsmethode die Zunahme der Kapazität des Meßkondensators der Kapazitätsverminderung des Präzisionskondensators gleich und umgekehrt. Das Gerät wird von der Firma P. J. Kipp & Zonen, Delft (Holland) hergestellt<sup>2</sup>.

#### δ) Durchschlagsspannung.

**Begriffsbestimmung.** Tritt an einem Isolierstoffkondensator bei Steigerung der Spannung bei einer Spannung  $U$  ein Durchschlag auf, so

<sup>1</sup> Hersteller: Dielkometer-Laboratorium Haardt & Co. AG., Berlin-Südende.

<sup>2</sup> Über die Messung der Dielektrizitätskonstanten bei Ultrahochfrequenz siehe KING, R.: Rev. Sci. Instrum. (N. S.) Bd. 8 (1937) S. 201; ferner J. G. CHAFFEE: Proc. Inst. Radio Engrs, N. Y. Bd. 22 (1934) S. 1009.

heißt  $U$  die Durchschlagsspannung des Isolierstoffes. Meist wird für die Ermittlung dieses Wertes Wechselfeldspannung von 50 Hz benutzt und die Durchschlagsspannung in  $V_{\text{eff}}$  oder in  $kV_{\text{eff}}$  angegeben. Als Durchschlagsspannung gilt die aus dem gemessenen Scheitelwert unter Zugrundelegung einer reinen Sinusform berechnete effektive Spannung. Momentanspannung ist die Spannung, die bei plötzlichem Anlegen der Elektroden mit dem vollen Spannungswert noch ausgehalten wird, z. B. bei fortlaufender Prüfung von Bändern und Papieren zwischen Walzen u. a.

Eine der Elektroden nach S. 69 ist möglichst zu erden. Die stoßfreie allmähliche Steigerung der Spannung soll von Null beginnen und

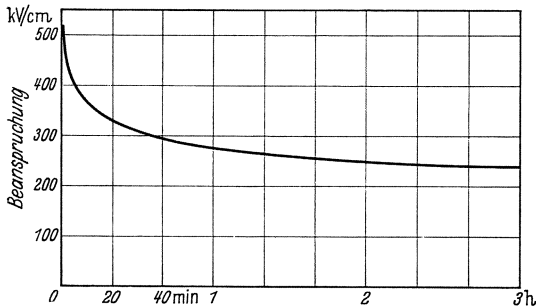


Abb. 97. Abhängigkeit der Durchschlagsfestigkeit von der Beanspruchungsdauer. Werkstoff: Ölprägniertes Papier.

ist so zu wählen, daß ein Durchschlag in etwa 30 s eintritt. Wird die Spannung in Stufen gesteigert, so sollen die Stufen nicht größer sein als 2% des zu erwartenden Endwertes. Wird an einer Reihe gleicher Prüfkörper die Höhe der Durchschlagsspannung in Abhängigkeit von der Dauer der Spannungsbeanspruchung

ermittelt, so zeigt diese Kurve unter Vernachlässigung der Streuung der einzelnen Meßwerte die in der Abb. 97 wiedergegebene Form. Diese Zeit-Durchschlagskurven sind für die verschiedenen Isolierstoffe und ihr elektrisches Verhalten kennzeichnend. Zur Überwachung der Fabrikation werden vielfach Spannungsprüfungen mit den Spannungen ausgeführt, die vom Isolierstoff gerade noch eine bestimmte Zeit ausgehalten werden, ohne daß ein Durchschlag eintritt. Man spricht dann von einer 1-, 5- oder auch 30-min-Spannung, und meint die Spannung, die 1, 5 oder 30 min lang ausgehalten wird. Unter Berücksichtigung eines Sicherheitsfaktors stimmen die Spannungen der Kurve bei 1, 5 und 30 min mit der 1-, 5- und 30-min-Prüfspannung überein.

**Einrichtungen für die Bestimmung der Durchschlagsspannung.** Der für die Spannungsprüfung benutzte Transformator soll eine Mindestleistung besitzen, die sich aus seiner Nennspannung angenähert nach der Gleichung  $N \approx 0,00075 U^2 + 0,250$  für  $U$  in kV ergibt. Die Kurzschlußspannung soll 10% bei Spannungen bis 100 kV nicht überschreiten. Die Erregung des Prüftransformators erfolgt durch Regeln des Erregerstromes des den Transformator speisenden Generators. Die Stufen der Regelwiderstände sind klein zu halten, damit nicht beim Regeln kurzzeitige Überspannungen entstehen. Einer Stufe soll nicht mehr als  $\frac{1}{2}\%$  Spannungsänderung entsprechen. Bei kleinen Leistungen sind Schiebe-

widerstände geeigneter. Statt des Generators kann ein Regeltransformator benutzt werden, sofern eine feinstufige Steigerung der Spannung gewährleistet ist. Bei Regeldrosseln und bei Vorschaltwiderständen vor dem Transformator besteht die Gefahr einer Veränderung der Kurvenform der Hochspannung, bei Drosseln außerdem die Gefahr einer Resonanz mit der Kapazität des Gesamtkreises.

Die *Kurvenform* der Hochspannung soll praktisch sinusförmig sein. Sie kann mit der Braunschen Röhre und kapazitivem Spannungsteiler bis zum Durchschlag verfolgt werden<sup>1</sup>. Die Abweichung des Kurvenverlaufes von der Sinusform kann man mit Hilfe einer Resonanzbrücke zahlenmäßig auch bei Hochspannung festlegen<sup>2</sup>. Die Abweichung soll nicht mehr als 3% betragen. Das Verhältnis von Scheitelwert zu Effektivwert der Spannung ist der Scheitelfaktor.

Für die *Hochspannungsmessung* sind folgende Meßverfahren geeignet:

1. Bei bekanntem Übersetzungsverhältnis *Messung der Primärspannung des Transformators mit einem astatischen Voltmeter*. Die Ermittlung des *Übersetzungsverhältnisses* kann unter Benutzung der für die Verlustwinkelmeßbrücken vorhandenen Hilfsmittel nach Abb. 98 erfolgen<sup>3</sup>. Für die abgeglichene Brücke gilt

$$\dot{U} = \frac{U_s}{U_p} = \frac{C_2}{C_1} \frac{r}{R+r} = \cos \alpha; \quad \operatorname{tg} \alpha = \varrho \omega C_2.$$

Das Übersetzungsverhältnis ist in Abhängigkeit von verschiedenen kapazitiven Belastungen des Prüftransformators zu bestimmen und gegebenenfalls graphisch aufzutragen. Ist eine stärkere Abhängigkeit vorhanden (bei großer Kurzschlußspannung des Transformators), so ist jeweils die kapazitive Belastung des Transformators zu ermitteln und das Übersetzungsverhältnis aus dem Kurvenzug zu entnehmen<sup>4</sup>.

2. Mit einem *Meßwandler*. Spannungswandler der Klassenziffer 0,2 sind für genaueste Laboratoriums- und Prüffeldmessungen bei hoher

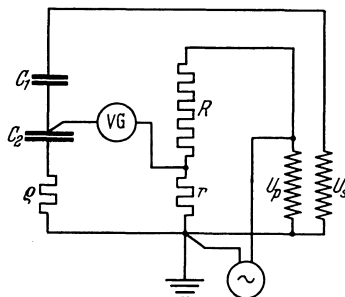


Abb. 98. Brückenordnung zur Messung des Übersetzungsverhältnisses von Transformatoren.

<sup>1</sup> VIEWEG, R. u. G. PFESTORF: ETZ Bd. 53 (1932) S. 913.

<sup>2</sup> LINCKH, H. E.: Phys. Z. Bd. 39 (1938) S. 727. Anstatt der gesamten Hochspannungswelle wird nur die Abweichung von der Sinusform, d. h. der Gehalt an Oberwellen gemessen und diese abhängig von der Grundwellenspannung auf dem Leuchtschirm einer BRAUNschen Röhre aufgezeichnet.

<sup>3</sup> SCHERING u. BURMESTER im Tätigkeitsbericht der Phys.-techn. Reichsanstalt. Z. Instrumentenkde. Bd. 44 (1924) S. 97. — YOGANANDAM, G.: J. Instn. electr. Engrs. Bd. 68 (1930) S. 192.

<sup>4</sup> Die Schering-Brücke kann auch direkt zur Messung der Spannung benutzt werden, siehe dazu H. JENSS: ETZ Bd. 52 (1931) S. 7.

Phasenverschiebung vorgesehen. Die Klassenziffer ist dabei die prozentuale Abweichung der sekundären Spannung, die sich unter Zugrundelegung des Nennübersetzungsverhältnisses ergibt<sup>1</sup>.

3. Mit einem *Hochspannungsvoltmeter*. Statische Multizellular-Voltmeter und Hochspannungsvoltmeter nach STARKE-SCHRÖDER, Aachen, sind bei fester Aufstellung und nach Eichung bequeme Einrichtungen für Hochspannungsmessungen.

4. Mit dem *Scheitelwert-Meßgerät*. Der durch einen Kondensator fließende Ladestrom wird durch Röhren gleichgerichtet und mittels Gleichstromgalvanometer gemessen. Der Ausschlag des Instrumentes ist dem Scheitelwert der Wechselfspannung proportional<sup>2</sup>. Voraussetzung für die richtige Anzeige ist eine Kurvenform ohne Zwischenscheitel<sup>3</sup>. Als Kondensatoren sind Normal-Luft- und Preßgaskondensatoren geeignet.

**Prüfkörper für Durchschlagsspannungsmessungen.** Als Prüfkörper sind ebene Platten von 3 bis 5 mm Dicke und  $150 \times 150 \text{ mm}^2$  Fläche geeignet, in deren Mitte von einer oder von beiden Seiten halbkugelige Vertiefungen angebracht sind, so daß die Dicke an der dünnsten Stelle 1 bis 3 mm beträgt. Die Einsenkungen sind mit Elektroden zu versehen. Die Vertiefungen sind bei leicht bearbeitbaren Stoffen wie Hartgummi u. a. mit einem Kugelfräser anzubringen; eine einseitige Vertiefung in der Mitte der Probeplatte ist dem Prüfling mit Vertiefungen auf beiden Seiten vorzuziehen, da beim Einsenken die Prüflinge gerade an der Durchschlagstelle mechanisch besonders stark vorbeanspruchtet werden und die zweite Einsenkung auf der Rückseite der Platte gewöhnlich ohne Widerlager erfolgt. Bei zweiseitig gesenkten Hartgewebeplatten führen diese mechanischen Beanspruchungen zu Fehlmessungen. Im Falle einer einseitigen Vertiefung ist als Gegenelektrode eine ebene Platte mit abgerundeten Kanten von 50 mm Dmr. zu verwenden.

Für Untersuchungen keramischer Werkstoffe werden Scheiben von 80 mm Dmr. und 8—10 mm Dicke benutzt, in die einseitig eine kalottenartige Vertiefung eingeschliffen wird. Der Kugeldurchmesser der Kalotte soll 20 mm betragen, die Dicke an der dünnsten Stelle 1,5 mm. Dieses Maß ist mit einer Toleranz von  $\pm 10\%$  einzuhalten.

Isolierstoffe wie Preßspan, Fiber und Filme, die in Stärken unter 3 mm vorwiegend oder ausschließlich Verwendung finden, sind in der Herstellungsdicke auf ihre Durchschlagsspannung zu prüfen. Als Elektroden für die Messung der Durchschlagsspannung sind zwei ebene Messingelektroden mit abgerundeten Kanten von 50 mm Dmr. zu verwenden.

<sup>1</sup> SKIRL, W.: Wechselstrom-Leistungsmessungen, 3. Aufl., S. 93. Berlin: Julius Springer 1930.

<sup>2</sup> STOERK, C. u. W. HOLZER: Z. techn. Phys. Bd. 10 (1929) S. 317.

<sup>3</sup> JAKUBOWSKI, J. L.: Arch. Elektrotechn. Bd. 30 (1936) S. 430. — KÖNIG, H.: Helv. phys. Acta Bd. 2 (1929) S. 357.



An inhomogenen Isolierstoffen, z. B. Papier, sinkt die Durchschlagsspannung bei Verwendung von größeren Elektrodenflächen. Der Grund hierfür liegt darin, daß in einer größeren Fläche leichter eine Stelle geringerer elektrischer Festigkeit vorhanden ist als in kleinen Flächen. Die Inhomogenitäten werden mit anderen üblichen Beobachtungsverfahren nicht ohne weiteres festgestellt. Werte, die an verschiedenen Arten von Prüfkörpern und mit verschiedenen Elektrodenformen gewonnen wurden, sind nicht vergleichbar.

Bei der Ermittlung der Durchschlagsspannung vergießbarer Massen sind besondere Vorsichtsmaßnahmen erforderlich, um infolge der starken Volumenkontraktion dieser Massen beim Erstarren ein Reißen zwischen den Elektroden oder ein Auftreten dünner Luft- oder Vakuumkanäle zu verhindern<sup>1</sup>.

Tritt der Durchschlag nicht an der dünnsten Stelle zwischen den Elektroden auf, so liegt eine ungleiche Feldverteilung oder eine besondere elektrische Inhomogenität des Isolierstoffes vor.

Für die Ermittlung der Durchschlagsspannung fester Stoffe sind wegen der Streuung der Meßwerte *mindestens* fünf gleiche Proben eines Isolierstoffes erforderlich. Eine größere Anzahl ist wegen der Ermittlung der statistischen Verteilung (siehe 167) vorteilhaft.

**Durchschlagsspannung in Abhängigkeit von der Frequenz.** Messungen der Durchschlagsspannung in Abhängigkeit von der Frequenz werden bei der allgemeinen Isolierstoffprüfung nicht vorgenommen. Isolierstoffe, die bei höheren Frequenzen und Hochspannung Verwendung finden, werden einer Spannungsprüfung bei der Arbeitsfrequenz von mindestens 30 min Dauer unterworfen.

**Durchschlagsspannung in Abhängigkeit von der Kurvenform<sup>2</sup>.** Die Durchschlagsspannung ist nicht unabhängig von der Kurvenform. In den Prüfvorschriften der verschiedenen Länder wird daher auch die Ermittlung mit praktisch sinusförmiger Wechselfeldspannung gefordert. Die Art der Abhängigkeit der Durchschlagsspannung von der Kurvenform stellt ein Kriterium für die beiden Haupttheorien des elektrischen Durchschlages, den Wärmedurchschlag nach K. W. WAGNER<sup>3</sup> und den rein elektrischen Durchschlag, Zerreißen des Kristallgitters durch Elektronenlawinen, Durchdringung der positiven und negativen Ionenflächen, dar. Nach der Wärmetheorie muß eine Abhängigkeit vom Effektivwert, nach der elektrischen Theorie eine vom Scheitelwert, bestehen. Für Kabelpapier ergibt sich ein fast rein feldstärkebedingter Zusammenbruch, bei Werkstoffen wie Hartpapier, Cellon,

<sup>1</sup> VIEWEG, R. u. G. PFESTORF: ETZ Bd. 57 (1936) S. 632.

<sup>2</sup> GÄNGER, B.: Arch. Elektrotechn. Bd. 32 (1938) S. 401.

<sup>3</sup> WAGNER, K. W. u. A. GEMANT: Berl. Ber. 1934 S. 100. — BECKER, R.: Arch. Elektrotechn. Bd. 30 (1936) S. 411.

Transformatoren- und Paraffinöl scheint ein thermisch bedingter Durchschlag vorzuliegen.

**Durchschlagsspannung in Abhängigkeit von der Beanspruchungsdauer.** Die Zeitdurchschlagskurve auf S. 150 ist nach kürzeren Beanspruchungszeiten eingehend untersucht worden. Mit Hilfe von Wanderwellenvorgängen auf Leitungen hat man die Möglichkeit, Isolierstoffe von 10 s Dauer bis herab zu  $3 \cdot 10^{-9}$  s Dauer zu beanspruchen<sup>1</sup>. Die Durchschlagsspannung steigt mit der Abnahme der Beanspruchungsdauer, und zwar ist das Verhältnis zweier Durchschlagsspannungen bei verschiedenen Beanspruchungszeiten bei jedem Elektrodenabstand praktisch das gleiche. Die Durchschlagsspannungen aller Flüssigkeiten streben bei kurzen Beanspruchungszeiten einem gemeinsamen Grenzwert zu.

**Durchschlagsspannung in Abhängigkeit von der Polarität.** Bei Durch- und Überschlägen mit Wechselspannung, z. B. an Porzellanisolatoren ist es oft erwünscht, festzustellen, welche Polarität der Spannungshalbwelle zum Über- oder Durchschlag führte. Dies kann mit Hilfe eines Oszillographen, der über einen Hochspannungsteiler parallel zum Prüfkörper angeschaltet wird, oder durch den Ausschlag eines Zeigerinstrumentes geschehen. Ein ballistisches Gleichstromgalvanometer in Reihe mit einem Kopplungskondensator liegt parallel zum Prüfling. Vor dem Überschlag fließt durch den Kopplungskondensator und das Gleichstromgalvanometer ein Wechselstrom, der keinen Ausschlag bewirkt. Durch den Über- oder Durchschlag entlädt sich der Kopplungskondensator über die Funkenstrecke und das Galvanometer und bewirkt einen Stromstoß im Galvanometer, der dem Augenblickswert der Spannung der Entladungstrecke entspricht und durch seine Richtung die Polarität anzeigt<sup>2</sup>.

**Durchschlagsfestigkeit.** Als Durchschlagsfestigkeit eines Versuchskörpers gilt der Quotient aus der Durchschlagsspannung und der Plattendicke an der Durchschlagsstelle in einem homogenen Feld. Obwohl die Durchschlagsspannung meist nicht linear mit der Dicke des Isolierstoffes ansteigt und eine genaue theoretische Berechnung der Feldverteilung um die Elektroden und im Isolierstoff wegen der unbekanntenen Ionenverteilung nicht möglich ist, gibt man häufig die für 1 cm Isolierstoffstärke errechnete Durchschlagsfestigkeit in kV/cm an. Die Durchschlagsfestigkeiten, die von verschiedenen Meßstellen an dem gleichen Werkstoff ermittelt wurden, sind nur vergleichbar, wenn die äußeren Versuchsbedingungen bekannt und genau die gleichen sind. Es ist irreführend, von einer Durchschlagsfestigkeit der Stoffe schlechthin zu sprechen, ohne die Versuchsanordnung und Versuchsdurchführung genau zu kennen. Der Begriff der

<sup>1</sup> NAEHER, R.: Diss. Dresden 1928, 36 S.; Arch. Elektrotechn. Bd. 21 (1929) S. 169.

<sup>2</sup> DEBUS, K. u. E. HUETER: ETZ Bd. 60 (1939) S. 195; ferner WEBER, W.: Siemens-Z. Bd. 18 (1938) S. 296.

Durchschlagsfestigkeit, der aus dem Wunsche nach einer einheitlichen, vergleichbaren Materialkonstante entstanden ist, kann den Konstrukteur zu falschen Überlegungen und Fehlkonstruktionen führen, sofern er nicht die verschiedenen Arten der Durchschläge elektrischer Isolierstoffe berücksichtigt. Auch die Tatsache, daß unter ganz besonderen Versuchsbedingungen, Unterdrückung der Randentladungen, besondere Form der Elektroden, ein geradliniger Verlauf der Durchschlagsspannung in einem gewissen Bereich in Abhängigkeit von der Isolierstoffstärke beobachtet wird, berechtigt noch nicht zu dem Schluß, daß der daraus errechnete Wert die echte Durchschlagsfestigkeit und die wirkliche Materialkonstante ist. Eine Durchschlagsfestigkeit schlechthin kann mithin nicht ohne weiteres für die Errechnung der Durchschlagsspannung zwischen beliebigen Elektroden und bei beliebiger Dicke des Isolierstoffes benutzt werden.

Bei eingearbeiteten kugelförmigen Elektroden und bei flüssigen Isolierstoffen zwischen kugel- oder halbkugelförmigen Isolierstoffen ist die Feldverteilung bei der Errechnung der Durchschlagsfestigkeit zu berücksichtigen. Ein nicht mehr homogenes Feld zwischen den Elektroden bewirkt, daß die zum Durchschlag führende Spannung niedriger ist als im gleichförmigen Felde. Diese Inhomogenität nimmt mit wachsendem Abstand der Elektroden (Dicke des Prüflings) zu und dementsprechend auch das Verhältnis  $\alpha$  der wirklichen, an der Kugeloberfläche herrschenden Feldstärke zur Feldstärke im gleichförmigen Felde<sup>1</sup>. Unter Berücksichtigung der Feldverteilung erhält man die Durchschlagsfestigkeit in kV/cm für die Elektroden Kugel—Kugel und Kugel—Platte, wenn man die gemessene Durchschlagsspannung mit einem Faktor gemäß der Abb. 99, S. 156 multipliziert. Der Faktor hat die Dimension  $\text{cm}^{-1}$ . Sofern die Dicken der Prüflinge (Entfernung Kugelsenkung—Platte oder Kugel—Kugel) untereinander nicht stark abweichen, ist die mittlere Durchschlagsfestigkeit der Mittelwert der Durchschlagsspannung multipliziert mit dem Faktor der Abb. 99<sup>2</sup>. Bei der Angabe des Quotienten aus der Durchschlagsspannung und der Dicke der Platte an der dünnsten Stelle ist die Lage des Durchschlagskanals nicht zu berücksichtigen.

**Spannungsprüfungen und Durchschlagsmessungen nach ausländischen Vorschriften.** Da das Ergebnis elektrischer Spannungsprüfungen von der Meßanordnung beeinflusst wird, ist eine genaue Prüfanweisung in den Vorschriften unerläßlich. Die vorhergehenden Abschnitte bezogen sich auf Prüfungen unter Zugrundelegung der deutschen Vorschriften. Zum Vergleich sind nachfolgend die wichtigsten ausländischen wiedergegeben.

<sup>1</sup> SCHUMANN, W. O.: Elektrische Durchbruchfeldstärke, Berlin 1923, S. 29.

<sup>2</sup> Über graphische Ermittlung der Durchschlagsspannungen s. ETZ Bd. 47 (1926) S. 158.

1. Amerika. Auch hier wird zwischen der Durchschlagsspannung schlechthin, der 1-min-Stufenspannung und einer Dauerspannungsprüfung unterschieden.

*Elektroden.* Die Elektroden sind 2 Zylinder aus Messing oder Kupfer mit ebener Grundfläche und abgerundeten Kanten. Die Abmessungen betragen für

a) *Folien und Platten.* Zylinderdurchmesser 50,8 mm; Zylinderhöhe 25,4 mm; Krümmungsradius der Grundflächenkante 6,35 mm.

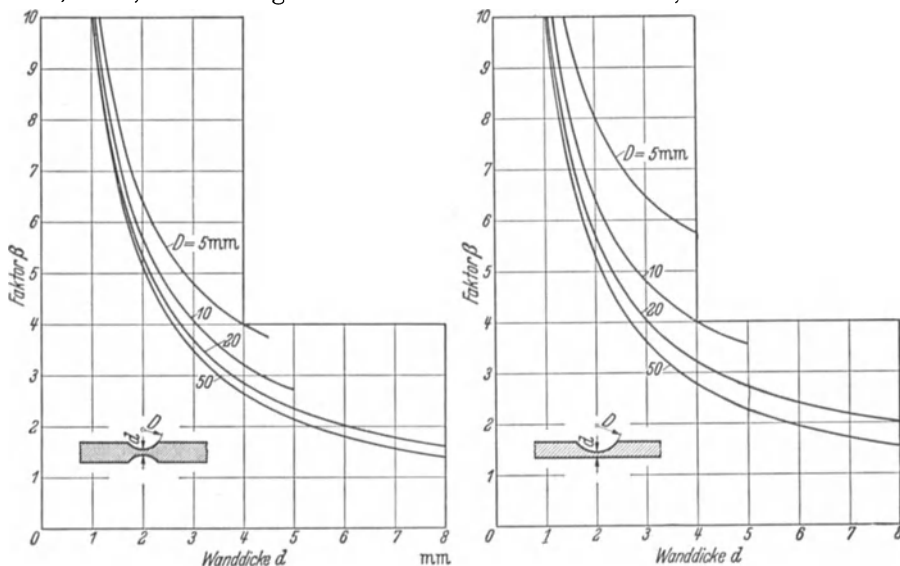


Abb. 99. Umrechnungsfaktor zur Ermittlung der Durchschlagfestigkeit aus der Durchschlagsspannung für die Elektrodenanordnung Kugel-Kugel und Kugel-Platte.

b) *Bänder.* Zylinderdurchmesser 6,35 mm; Krümmungsradius der Grundflächenkante 0,8 mm.

Das Gewicht der oberen Elektrode soll  $45,4 \pm 2,3$  g betragen.

c) *Preßstoffe.* Zylinderdurchmesser 25,4 mm; Zylinderhöhe 25,4 mm; Krümmungsradius der Grundflächenkante 3,18 mm.

d) *Keramische Werkstoffe.* Auf kreisförmige Platten von 50,8 mm Dmr. mit parallelen Endflächen, Stärke der Platten 6,35, 10,16, 19,05 oder 25,4 mm werden Quecksilberelektroden von 19,05 mm Dmr. konzentrisch aufgebracht. Dazu wird unten ein Metallrohr, oben ein Glasrohr, mit Siegellack angekittet. Das Rohr wird etwa 10 mm tief in geschmolzenen Siegellack getaucht und sofort auf die keramische Platte gedrückt. Die keramische Probe wird vor der Prüfung nicht erhitzt.

*Durchschlagsspannung.* Mit Null beginnend wird die Spannung stoßfrei um 0,5 kV je s gesteigert, vorausgesetzt, daß der Durchschlag nicht innerhalb von 40 s erfolgt. Tritt der Durchschlag schon unterhalb

5 kV ein, dann wird die Zeit bis zum Durchschlag von 40 auf 20 s herabgesetzt. Die Prüfung wird in Luft bei Raumtemperatur ausgeführt.

*1-min-Stufenspannung.* Die Anfangsspannung soll 40% der Durchschlagsspannung betragen und ist aus der folgenden Tabelle 14 zu entnehmen. Dann ist die Spannung in Stufen gemäß der Tabelle bis zum Durchschlag zu steigern, wobei in jeder Stufe die Spannung 1 min lang konstant zu halten ist. Die Zeit der Änderung der Spannung von einer Stufe zur nächsthöheren soll höchstens 10 s betragen.

Tabelle 14.

Durchschlagsspannung schlechthin in kV	1-min-Stufenspannung, beginnt mit 40%, abgerundet auf kV	Höhe der Stufe in kV
12,5	0,5	0,5
12,5 bis 25	1,0	1,0
25 bis 50	2,5	2,5
50 bis 100	5,0	5,0
über 100	10,0	10,0

Beträgt z. B. die Durchschlagsspannung bei allmählicher Spannungssteigerung 41 kV, so wird die Prüfung wie folgt vorgenommen: Mit 40% der Durchschlagsspannung = 16,4 kV ist zu beginnen. Dieser Wert ist entsprechend den Stufen von 2,5 auf 17,5 aufzurunden und die Spannungssteigerung in Stufen von 2,5 kV durchzuführen. Die nächste Spannungsbeanspruchung 1 min lang wäre danach 20 kV usw.

*Dauerdurchschlagsspannung.* Für die Ermittlung dieses Wertes ist eine Spannung von 10% der Durchschlagsspannung abgerundet auf 1 kV 30 min lang anzulegen. Die Spannung soll dann in Stufen von 20% des Anfangswertes bis zum Durchschlag gesteigert werden, wobei die Dauer der Beanspruchung in jeder Stufe 30 min beträgt. Gleichzeitig mit der Spannungsbeanspruchung soll eine Temperaturmessung an dem Prüfling durchgeführt werden. Während der ersten Stufe erfolgt die Temperaturmessung am Ende der 30-min-Beanspruchung. Die Temperatur steigt hier allmählich, bis unmittelbar vor dem Durchschlag ein steiler Anstieg der Temperatur erfolgt. In diesem Zeitintervall sind häufiger Temperaturablesungen vorzunehmen. Im Bericht ist als Abszisse die Zeit in Stunden der Beanspruchung, als Ordinate die Temperatur in °C aufzutragen. Zusätzlich zu den Werten der Zeit soll die Spannung in kV vermerkt werden. Die charakteristischen Werte, die aus der graphischen Darstellung entnommen werden, sind: Dauer des Versuches, Durchschlagsspannung, Temperatur des Prüflings beim Durchschlag und Temperaturanstieg während der Prüfung.

2. England. Die englischen Prüfvorschriften sehen für Isolierpreßstoffe folgendes Verfahren zur Ermittlung der elektrischen Festigkeit vor:

Die obere Elektrode besteht aus einem Messingzylinder von 37 mm Dmr. und 37 mm Höhe mit abgerundeten Kanten. Die untere Elektrode ist ein Messingzylinder von 75 mm Dmr. und 25 mm Höhe mit ab-

gerundeten Kanten. Der Radius der Abrundung der Kanten soll 0,8 mm betragen. Sofern die Oberfläche des Prüflings rau und ein guter Kontakt mit der Elektrode nicht gewährleistet ist, sind die Elektroden nach dem deutschen Muster mit Blattmetall gepolstert.

Die Prüfung wird mit Wechselspannung von 50 Hz ausgeführt. Die Kurvenform soll praktisch sinusförmig und der Scheitelwert nicht größer als das 1,45fache des Effektivwertes sein. Der Effektivwert der Durchschlagsspannung soll auf der primären Seite des Transformators mit einem üblichen Voltmeter oder mit Hilfe eines Spannungswandlers ermittelt werden. Die Prüfung soll mit 30% der Prüfspannung beginnen und um 1000 V/s bis zur Prüfspannung gesteigert werden. Die Prüfspannung ist während 1 min konstant zu halten.

Derartige Spannungsprüfungen sind für Hartpapiere unter Öl bei 90° für 6,35 mm starke Platten mit 34 kV, für Isolierpreßstoffe nach 24stündiger Lagerung in Wasser von Raumtemperatur mit 64 kV/cm, bei erhöhter Temperatur entsprechend den englischen Temperaturstufen, z. B. bei einer Wärmefestigkeit von 140° C mit 11,1 kV/cm, während 1 min vorzunehmen.

3. Frankreich. Als Elektroden dienen nach den französischen Vorschriften zwei Kupferzylinder von 14 mm Dmr. mit abgerundeten Kanten von 2 mm Krümmungsradius. Die Prüfkörper sollen eine Dicke von  $3 \pm 0,25$  mm besitzen. Die Durchschlagsspannung wird mit Wechselspannung von 40 bis 60 Hz durch allmähliche Spannungssteigerung von 500 V/s beginnend mit 500 V ausgeführt. Die Durchschlagsspannung in V wird auf eine Dicke des Prüflings von 3 mm durch die Formel  $E = \frac{3U}{a}$  umgerechnet. Dabei bedeutet  $U$  die Durchschlagsspannung und  $a$  die Dicke des Prüflings in mm.

Für Preßspan und Hartpapier wird die Durchschlagsspannung auf 1 mm Probedicke bezogen. Die Elektroden bestehen aus einer ebenen Metallplatte und einem Messingzylinder von 30 mm Dmr. und einem Gewicht von 1 kg. Die Kanten der Elektroden sind mit einem Krümmungsradius von 3 mm abgerundet. Die Spannungssteigerung erfolgt um 1000 V/min bis zum Durchschlag.

4. Schweiz. Die der Durchschlagsprüfung unterzogenen Proben sind auf gleiche Dicke zu bringen, dazu wird das zu prüfende Isolierstück beidseitig in der Mitte mit einem Kugelfräser von 20 mm Dmr. angefräst, bis die Materialdicke 1 bis 3 mm beträgt. In die so vorbereitete kalottenförmige Vertiefung werden 2 Kugelkalotten von 20 mm Dmr. mit 1 kg Druck gepreßt. Die Spannungssteigerung beträgt 1000 V/s. Zur Ermittlung des Einflusses der Oberfläche auf die Durchschlagsspannung wird in manchen Fällen der Werkstoff nur einseitig angefräst. Aus der Durchschlagsspannung bei allmählicher Spannungssteigerung wird der 1-min-Wert wie folgt gemessen: Beginnend mit

80% der Durchschlagsspannung wird die Zeit bis zum Eintritt des Durchschlages ermittelt. Tritt ein Durchschlag bei dieser Spannung nicht oder erst nach mehreren Minuten ein, so wird die Spannung bei den nächsten Proben allmählich gesteigert, bis der Durchschlag etwa 1 min nach Anlegen dieser Spannung erfolgt. Mit Rücksicht auf die Streuung der Werte ist eine erhebliche Anzahl von Prüfkörpern für die Ermittlung dieses Wertes erforderlich.

#### e) Lichtbogenfestigkeit.

Diese Prüfung gibt lediglich einen Anhaltspunkt über das Verhalten der Isolierstoffe im elektrischen Lichtbogen. Das Verhalten kann nach folgenden Verfahren in 5 Stufen unterteilt werden. Die Platte wird waagrecht gelegt und zwei angespitzte Reinkohlen von 8 mm Dmr. werden in einem Winkel von etwas mehr als einem rechten gegeneinander, etwa um  $60^\circ$  gegen die Waagerechte geneigt, auf die Platte gesetzt. An die Kohlen wird eine Gleichspannung von 220 V unter Vorschalten eines Widerstandes von  $20 \Omega$  gelegt. Nach Bildung des Lichtbogens werden diese mit einer Geschwindigkeit, die 1 mm/s nicht überschreiten soll, auseinandergezogen.

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

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

Stufe 2. Es bildet sich keine zusammenhängende, leitende Brücke im Isolierstoff. Unter der Einwirkung des Lichtbogens verbrennt, schmilzt oder verdampft der Isolierstoff.

Stufe 3. Der Lichtbogen läßt sich weiter als 20 mm ausziehen, es bildet sich aber keine zusammenhängende leitende Brücke im Isolierstoff.

Stufe 4. Der Lichtbogen läßt sich nicht über seine normale Länge von etwa 20 mm ausziehen.

Isolierstoffe mit Phenol-Kresol-Kunsthartz verkohlen und bilden leitende Rückstände, Gummi- und Hartgummi-Erzeugnisse verdampfen unter der Wirkung der hohen Temperatur, ohne jedoch selbst den elektrischen Strom zu leiten, Porzellan wird bei hohen Temperaturen mehr oder weniger leitend. Viele keramische Teile sind der hohen örtlichen Temperaturbeanspruchung nicht gewachsen und springen. Mycalex, Asbest sowie Zementasbest vertragen hohe Temperaturen und gestatten nicht das Ausziehen des Lichtbogens über 20 mm.

Amerikanischen Prüfvorschriften entsprechend hat man versucht, die Bewertung der Isolierstoffe mehr zu unterteilen. Man benutzt

deshalb nicht die dauernde Einwirkung eines Lichtbogens mit seiner starken Beanspruchung, sondern eine Einrichtung, die den Lichtbogen zunächst nur Bruchteile von Sekunden auf den Isolierstoff einwirken läßt. Als Maß der Lichtbogenfestigkeit wird die Zeitdauer gewählt, die aufgewandt werden muß, bis der bei Beginn des Versuches zwischen Wolframelektroden, die in einer Entfernung von 0,8 cm unter 45° auf den Isolierstoff aufgesetzt sind, auftretende Funkenüberschlag durch die Leitfähigkeit des Isolierstoffes verschwindet. Dieses Prüfverfahren<sup>1</sup> bietet den Vorteil daß es die Lichtbogenfestigkeit aller Isolierstoffgruppen feiner unterteilt, als es die 5 Stufen nach der Vorschrift des Verbandes Deutscher Elektrotechniker gestattet. In der Abb. 99 ist das Ergebnis der Prüfung an verschiedenen Isolierstoffen wiedergegeben.

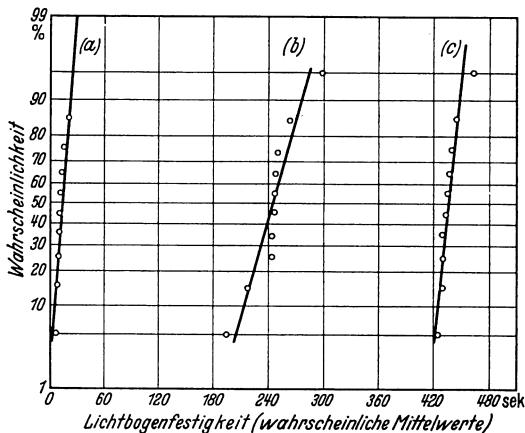


Abb. 100. Ergebnis der Prüfung der Lichtbogenfestigkeit nach amerikanischem Prüfverfahren.

teilt, als es die 5 Stufen nach der Vorschrift des Verbandes Deutscher Elektrotechniker gestattet. In der Abb. 99 ist das Ergebnis der Prüfung an verschiedenen Isolierstoffen wiedergegeben.

#### η) Kriechstromfestigkeit.

Preßstoffe auf organischer Grundlage mit organischen Füllstoffen verkohlen unter der Einwirkung des elektrischen Funkens an der Oberfläche

(vgl. dazu Lichtbogenfestigkeit S. 159) und verlieren ihre isolierenden Eigenschaften. Das Auftreten eines Abreißfunkens kann z. B. durch bewegte oder lose Kontakte, zeitweise oder dauernde Verschmutzung durch Elektrolyten und anderes hervorgerufen werden. Die Neigung zur Verkohlungs- und zur Kriechwegbildung ist bei den Isolierstoffen je nach dem Füllstoff verschieden. Es ist deshalb wünschenswert, diese Eigenschaft zahlenmäßig zu erfassen und ein Prüfverfahren zu entwickeln, das die Untersuchung der organischen Isolierpreßstoffe gestattet. Dabei ist zu berücksichtigen, daß die isolierenden Eigenschaften der Oberfläche von Phenol-Kresolharzen grundsätzlich andere sind, als z. B. diejenigen der Harnstoffharze. Harnstoffharze verkohlen unter der Einwirkung des Abreißfunkens. Die Rückstände sind bei Niederspannung nicht leitend und bilden erst bei Spannungen von über 1000 V an einen Kriechweg. Außer diesen Gruppen gibt es heute bereits organische Isolierstoffe, die in keinem Falle einen Kriechweg bilden oder Verkohlungsprodukte zeigen. Ein feinstufiges Prüfverfahren für diese interessanten Material-

<sup>1</sup> RACE, H. H. and F. W. WARNER: Gen. electr. Rev. Bd. 38 (1935) S. 97.



eigenschaften gibt es bis jetzt noch nicht. Einen Anhaltspunkt über die Kriechstromfestigkeit und eine ungefähre Erfassung dieser Eigenschaft bietet folgende Untersuchung.

Auf eine ebene waagerechte Fläche der Isolierstoffprobe werden zwei 5 mm lange schneidenförmige Elektroden in 5 mm Abstand aufgesetzt. Das Gewicht einer Elektrode soll etwa 200 g betragen. An den Elektroden liegt eine Wechselspannung von 300 V und 50 Hz. Der Strom wird durch einen Vorwiderstand von  $60 \Omega$  auf 5 A begrenzt. Zwischen die Elektroden wird aus einer Tropfflasche ein Tropfen von etwa 0,2 mg Gewicht einer 0,5%igen Nekallösung gebracht<sup>1</sup>. (Die spezifische Leitfähigkeit der  $\frac{1}{2}$ %igen Lösung ist bei  $20^\circ$   $2800 \mu\text{S cm}^{-1}$ .)

Die Flüssigkeit verdampft unter der Wirkung des Stromes. Nach dem Abreißen der Flüssigkeitsbrücke, im allgemeinen nach einer Zeit kleiner als 30 s, wird ein zweiter Tropfen zwischen die Elektroden gebracht. Es wird die Anzahl der Tropfen bzw. bei 30 s Tropfenabstand die Zeit bis zur Bildung eines leitenden Kriechweges als Maß für die Kriechstromfestigkeit gewertet.

Die Isolierstofftypen (s. S. 285) S, O, T1 bis T3, Z1 bis Z3 und 7 sind nicht kriechstromfest. Ein Kriechweg bildet sich nach dem Nekalprüfverfahren nach weniger als 10 Benetzungen; weniger Neigung zur Bildung eines leitenden Strompfades zeigen die Typen M, 11 und 12, während die Typen 2, 3, 4 und K als kriechstromfest anzusehen sind<sup>2</sup>.

Aus dem Versagen eines Stoffes bei der Prüfung auf Kriechstrom-Festigkeit ist noch kein Urteil über die Kriechstrom-Sicherheit von Fertigstücken aus den gleichen Isolierstoffen zu gewinnen, da die Kriechstromsicherheit der Geräte nicht ausschließlich eine Stoffeigenschaft, sondern auch eine Frage der Konstruktion ist.

#### f) Elektrische Eigenschaften unter besonderen Versuchsbedingungen.

**Vorbehandlung der Isolierstoffe.** Vor den elektrischen Messungen werden im allgemeinen die Isolierstoffe vorbehandelt, um die in der Praxis geübten Gepflogenheiten nachzuahmen, z. B. das Trocknen von Transformatorenöl oder um das Verhalten der Stoffe bei den Beanspruchungen in der Praxis zu erforschen und gleichzeitig für den Vergleich der Isolierstoffe untereinander eine gemeinsame Grundlage zu schaffen. Die Vorbehandlung besteht in einer Lagerung bei bestimmter Feuchtigkeit, der Einwirkung von Wärme oder vermindertem bzw. erhöhtem Druck. Auch mechanische Vorbehandlungen, z. B. Abschleifen,

<sup>1</sup> Nekal BX, ein Erzeugnis der I.G. Farben, ist das Natriumsalz einer kernalkylierten Naphthalin-Sulfosäure.

<sup>2</sup> Einen Beitrag zur Frage der Kriechstromfestigkeit der Kunststoffe in Abhängigkeit vom Benutzungsmittel lieferte: STÄGER, H., R. SÄNGER u. W. SIEGFRIED: Helv. phys. Acta Bd. 12 (1939) S. 561.

Falzen u. a., kommen in Frage. Die Herrichtung der Prüfkörper für die Untersuchung, z. B. der Prüfkörper für die Durchschlagmessungen, soll so schonend erfolgen, daß eine Veränderung der elektrischen Eigenschaftswerte nicht eintritt.

In der Übersicht sind die in Deutschland üblichen Vorbehandlungen vor der Bestimmung der elektrischen Eigenschaften für einige wichtige Isolierstoffgruppen zusammengestellt.

Tabelle 15. Übersicht über die in Deutschland üblichen Vorbehandlungen vor der Bestimmung der elektrischen Eigenschaften.

- a) 24 h Liegen in Wasser von Raumtemperatur, oberflächliches Abtrocknen und 2stündiges Stehen in Luft von 65% relativer Feuchtigkeit
- b) 4tägiges Lagern in einem Raum mit 80% relativer Luftfeuchtigkeit
- c) 24 h Lagern in einem Raum mit 80% relativer Luftfeuchtigkeit
- d) 4 h Trocknung im Thermostaten bei 70°
- e) 4 h Trocknung im Thermostaten bei 70° und anschließend 4tägiges Stehen in einem Raum mit 80% relativer Luftfeuchtigkeit
- f) 6 h Trocknung im Thermostaten bei 90°
- g) 6 h Lagern in Transformatorenöl von 105°

Welche Vorbehandlung vor der Bestimmung der verschiedenen elektrischen Eigenschaften bei den einzelnen Isolierstoffen angewandt werden, zeigt die nächste Zusammenstellung.

Tabelle 16. Vorbehandlung vor der Messung.

Isolierstoff	Oberflächenwiderstand	Widerstand im Innern	Dielektrischer Verlustfaktor und Kapazität	Durchschlagsspannung, Spannungsprüfung
Hartgummi . . .	a	b	b	—
Hartpapier . . .	d	d	d	d
	e	e	e	
Hartgewebe . . .	d	d	d	d
	e	e	e	
Preßspan . . . . .	—	c	—	f
Preßstoffe . . . . .	a	b	b	g

**Messung der elektrischen Eigenschaften in Abhängigkeit von der Temperatur.** Während bei den nicht isolierenden Stoffen, den elektrischen Leitern, die Änderungen der elektrischen Eigenschaften in Abhängigkeit von der Temperatur bereits seit langem bekannt sind und sich mit einer Genauigkeit von wenigen Promille je Grad bestimmen lassen, liegen die Verhältnisse besonders bei den organischen Isolierstoffen schwierig. Versuche haben gezeigt, daß hier die elektrischen Werte weniger Eigenschaftswerte sind, die sich jederzeit durch Wiederholung der Meßreihen

bestätigen lassen, sondern vielmehr Zustandsgrößen, die sich mit der Dauer der Wärmebehandlung und der Temperatur ändern. Um daher verschiedene Stoffe miteinander zu vergleichen, ist es notwendig, daß die Meßreihen in genau gleicher Weise an allen Proben durchgeführt werden. Dies ist möglich, wenn nicht nur eine der zu untersuchenden Platten, sondern gleich ein ganzer Plattenstapel von etwa 20 Stück unter voller Erhaltung der für die elektrischen Messungen notwendigen Abschirmung in einen Thermostaten gebracht wird. Die etwa 3 mm starken plattenförmigen Prüfkörper werden nach Art eines Schutzringkondensators mit Metallelektroden bespritzt. Der mittlere Durchmesser des Schutzspaltes soll 84,9 mm, die Breite des Schutzspaltes etwa 1 mm betragen (vgl. dazu S. 93). Die Platten werden unter Zwischenlage von Schutzzyklindern aus perforiertem Messingblech von etwa 16 mm Höhe gleichsinnig übereinander aufgestapelt. In jeden Zylinder ist eine biegsame abgeschirmte Meßleitung mit keramischer Isolation eingeführt. Die Art der Anordnung ist schematisch in Abb. 101 wiedergegeben. Die biegsamen Meßleitungen werden isoliert durch die Thermostatenwand durchgeführt und mit abgeschirmten Steckvorrichtungen mit der Brücke verbunden. Soll beispielsweise Platte 2 gemessen werden, so wird die Prüfspannung an die Abschirmung  $a'$  und die Meßbelegung  $a$  gelegt, während die Meßleitung  $b$  mit der Brücke und die Abschirmung  $b'$  mit Erde verbunden ist.

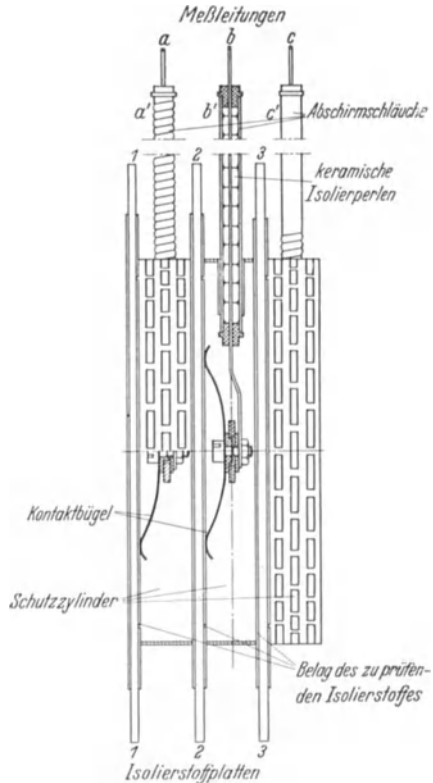


Abb. 101. Anordnung zahlreicher Platten für dielektrische Verlustmessung im Thermostaten.

Um durch den zeitlichen Ablauf bei der Ausführung der Messungen in verschiedenen Laboratorien nicht zu verschiedenen Meßergebnissen zu gelangen, ist folgende Versuchsdurchführung vorgesehen. Die Messungen sind bei fallender Temperatur bei 80, 60, 40° und Raumtemperatur (20°) auszuführen. Der Thermostat mit den Platten wird in 10 min auf die gewünschte Endtemperatur (80°) geheizt und die Platten bei dieser Temperatur durchgewärmt. Die Vorwärmung beträgt für 1 mm Platten-

dicke 15 min. Die üblichen, 3 mm starken Prüfkörper werden daher 45 min auf der Prüftemperatur gehalten. Anschließend werden in etwa 30 min die Messungen durchgeführt, wobei jeweils der zuerst untersuchte Prüfkörper am Ende der Meßreihe nochmals zu messen ist, um einen Anhalt über die Änderungen der dielektrischen Eigenschaften während der Meßdauer von 30 min zu erhalten. Die Temperatur wird sodann in 15 min auf 60° erniedrigt. Zwecks Temperatenausgleich werden die Platten wiederum 15 min für 1 mm Plattendicke bei der neuen Meßtemperatur gelagert und anschließend gemessen. Dasselbe Spiel wiederholt sich bei 40° und Raumtemperatur. Gegebenenfalls können Meßpunkte in der Nähe von 80, 60 und 40° gewählt und die Meßwerte durch einen Kurvenzug verbunden werden. Aus der Kurve sind die Werte für die Temperaturen von 80, 60, 40 und 20° zu entnehmen. Die übliche Meßspannung ist 1000 V bei 50 Hz. Aus parallel durchgeführten Gleichspannungsmessungen ergibt sich der Isolationswiderstand und aus den Abmessungen der oben genannten Prüfkörper der spezifische Widerstand  $\rho = 56,6 \cdot R/a$ , wobei  $R$  der gemessene Widerstand in  $\Omega$  und  $a$  die Dicke des Prüflings in cm ist.

An keramischen Werkstoffen, die bei wesentlich höheren Temperaturen als die organischen Isolierstoffe verwendet werden, ist die Messung des dielektrischen Verlustfaktors in gleicher Weise auszuführen, so lange dieser Wert kleiner als 0,1 ist. Bei höheren Temperaturen und größerer Leitfähigkeit ist wegen des elektrolytischen Leitungsmechanismus sowohl der Scheinwiderstand, der mit einem empfindlichen Wechselstrom-Galvanometer zu messen ist, als auch der Gleichstrom-Isolationswiderstand von Interesse<sup>1</sup>. Als Wechselstromgalvanometer sind Röhrengalvanometer oder auch Trockengleichrichterinstrumente geeignet.

**Dielektrische Messungen in Abhängigkeit vom Druck und von der Temperatur.** Während den Messungen der Durch- bzw. Überschlagespannung in Luft oder Gasen in Abhängigkeit vom Druck praktische Bedeutung (Preßgaskondensatoren und -durchführungen in Höchstspannungsanlagen) zukommt, haben die Messungen des dielektrischen Verlustfaktors und der Dielektrizitätskonstanten bisher nur rein wissenschaftliches Interesse gefunden. Eine Versuchseinrichtung für solche Messungen beschreibt H. W. L. BRÜCKMAN<sup>2</sup>. Die Messungen, die an Ölen, Gummi und Guttapercha in Abhängigkeit vom Druck bis zu einigen Atmosphären und von der Temperatur bis 120° bei Feldstärken von 30 bis 50 kV/cm ausgeführt werden, werden in einem Druckkessel vorgenommen. Als Isolierung für die Einführungen in das Druckgefäß bei den genannten Temperaturen bewährte sich ausschließlich Quarz und Porzellan.

<sup>1</sup> PFESTORF, G. u. E. F. RICHTER: Phys. Z. Bd. 39 (1938) S. 141. — RICHTER, E. F.: Phys. Z. Bd. 40 (1939) S. 597.

<sup>2</sup> BRÜCKMAN, H. W. L.: ETZ Bd. 50 (1929) S. 1874.

**Messungen bei konstanter relativer Luftfeuchtigkeit<sup>1</sup>.** Diese werden unter Verwendung eines Hygrostaten ausgeführt. Eine Einrichtung für die Messung der elektrischen Eigenschaften in Abhängigkeit von der relativen Luftfeuchtigkeit zeigt die Abb. 102. Sie besteht aus drei mit Schwefelsäure bestimmter Konzentrationen gefüllten Flaschen; durch eine von ihnen wird wahlweise umschaltbar der Luftstrom geleitet, der im oberen Meßraum eine konstante relative Luftfeuchtigkeit erzeugt. Wenn nur eine bestimmte Feuchtigkeit benötigt wird, kann auf die Luftumwälzung verzichtet werden. Über einer mit Schwefelsäure gefüllten photographischen Schale stellt sich in einem abgeschlossenen Gefäß eine konstante, von der Konzentration der Schwefelsäure abhängige Luftfeuchtigkeit ein (s. Abb. 103). Der Hygrostat, ein Holzgefäß mit Gummidichtung, soll etwa 50 l Inhalt bei einer Höhe von etwa 400 mm haben. Der Boden des Hygrostaten wird durch die Flüssigkeitsschale bedeckt. Die Flüssigkeitshöhe in der Schale soll nicht unter 30 mm betragen. Die Prüflinge werden im Hygrostaten auf einem Rost aus Metall, paraffiniertem Holz oder Hartgummi gelagert.

Für die Einführung der Spannungs- und Galvanometerleitung in den Hygrostaten dienen hochisolierte und feuchtigkeits-

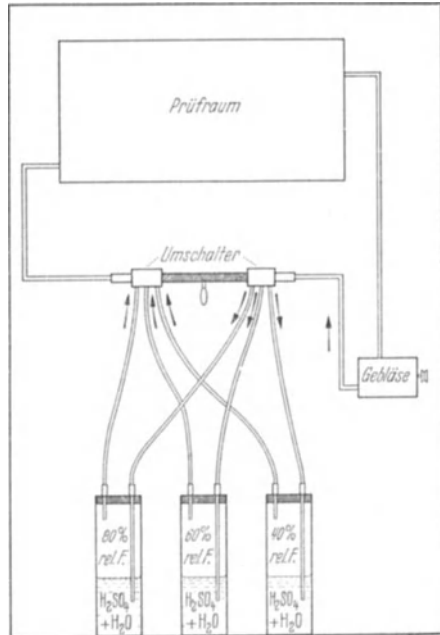


Abb. 102. Einrichtung zur Prüfung von Isolierstoffen in Abhängigkeit von der relativen Luftfeuchtigkeit und der Temperatur

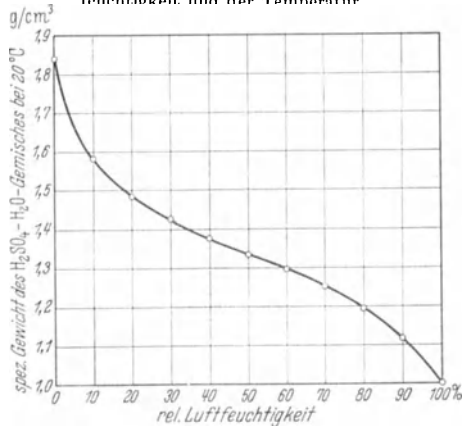


Abb. 103. Abhängigkeit der relativen Luftfeuchtigkeit vom spezifischen Gewicht des H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>-H<sub>2</sub>O-Gemisches.

<sup>1</sup> Siehe VDE Druckschrift 6308/1929; ferner F. MOENCH: ETZ Bd. 50 (1929) S. 929. Über das Verhalten der Isolierstoffe in Abhängigkeit von der Feuchtraumlagerung berichtet eine ausführliche Arbeit von W. ZEBROWSKI: ETZ Bd. 52 (1931) S. 1353.

abweisende, abgeschirmte Durchführungen. Hartgummi-Isolierungen und Paraffinüberzüge sind geeignet. Vorversuche ohne angeschlossenes Meßgut sind auszuführen, um mit Sicherheit Kriechströme von der Messung auszuschließen.

**Messungen bei erhöhter Luftfeuchtigkeit und erhöhter Temperatur.** Diese Messungen sind üblich zur Gewinnung eines Anhaltspunktes über die Bewährung der Isolierstoffe in klimatisch besonders gefährdeten Zonen. Bei der Prüfung ist zu unterscheiden, ob während der Messung der Taupunkt unterschritten werden darf oder nicht. Man spricht im ersteren Falle vielfach von sogenannten Tropenräumen, bei denen es weniger auf eine Konstanz von Temperatur und Feuchtigkeit als vielmehr auf eine willkürliche, besonders starke Feuchtigkeitsbeanspruchung ankommt. Im anderen Falle können Hygrostaten üblicher Bauart mit einer relativen Luftfeuchtigkeit bis zu 80% in einen Thermostaten eingesetzt werden. Übliche Versuchsbedingungen sind 30° und eine relative Luftfeuchtigkeit von 65% oder 80%. Man hat diese Bedingungen gewählt, da bei temperatur- oder feuchtigkeitsempfindlichen Proben ein übereinstimmendes Ergebnis bei der Prüfung in verschiedenen Laboratorien zu verschiedenen Zeiten bei Raumtemperatur ohne Klimatisierung *nicht* zu erwarten ist, da die üblichen Raumtemperaturen Schwankungen von mindestens 10° und die relativen Luftfeuchtigkeiten zeitlich große Schwankungen aufweisen. In manchen Fällen ist man deshalb dazu übergegangen, durch technische Großanlagen den ganzen Prüfraum zu klimatisieren.

**Veränderung bei Isolierstoffen durch das Prüfverfahren.** Abgesehen von der Ermittlung der Durchschlagsspannung und der Kriechstromfestigkeit gehören alle elektrischen Prüfungen zu den sogenannten „zerstörungsfreien Prüfverfahren“. Ihre Ergebnisse sind also jederzeit zu reproduzieren. Ein Vorbehalt wurde jedoch bereits auf S. 162 in Bezug auf die elektrischen Eigenschaften von organischen Stoffen in Abhängigkeit von der Temperatur gemacht. Hier war die Veränderung durch die Einwirkung der Wärme bedingt. Eine ähnliche Veränderung kann auch durch die elektrische Beanspruchung selbst auftreten, wenn eine zu hohe Prüfspannung bei großen dielektrischen Verlusten eine Erwärmung des Isolierstoffes hervorruft. Ebenso sind unter Umständen Veränderungen des Stoffes bei langen Dauerspannungsbeanspruchungen möglich. Hier ist als Beispiel die sogenannte X-Wachsbildung in ölprägnierten Papierkabeln sowie die Gasabsorption bzw. die Gasabgabe von Ölen unter dem Einfluß des elektrischen Feldes zu nennen. Eine Änderung des physikalischen Verhaltens durch das elektrische Feld ist im allgemeinen bei Isolierstoffen bisher unerwünscht. Der Gasaufnahme bzw. -abgabe von Ölen kommt jedoch bei der Verwendung des Öles als Hochspannungsisolierstoff Bedeutung zu, da bei genauer Kenntnis dieser Eigenschaften gewisse elektrische Erscheinungen im Kabel sich

beeinflussen lassen. Für die Bestimmung dieser Eigenschaften ist eine Einrichtung nach Abb. 104 vorgeschlagen worden. Das Isolieröl wird in das evakuierte Prüfgerät durch den Hahn *A* bis etwa zur Höhe *h* eingelassen. Sodann wird es etwa 15 min durch Durchströmen mit Wasserstoff gesättigt. Zwischen die V2A-Stahlelektrode und die äußere Metallbelegung wird eine Wechselspannung von etwa 10000 V angelegt, die eine Wasserstoffglimmentladung im oberen Teil des Rohres sowie eine elektrische Beanspruchung des Isolieröles im unteren Teil hervorruft. Die unter der Wirkung der Glimmentladung und des elektrischen Feldes auftretende Druckänderung wird im Manometerrohr in Abhängigkeit von der Dauer der Beanspruchung abgelesen. Auf diesem für die Zukunft vielleicht bedeutungsvollen Gebiet sind die experimentellen Untersuchungen, die von vielen Veränderlichen beeinflusst werden, noch nicht abgeschlossen.

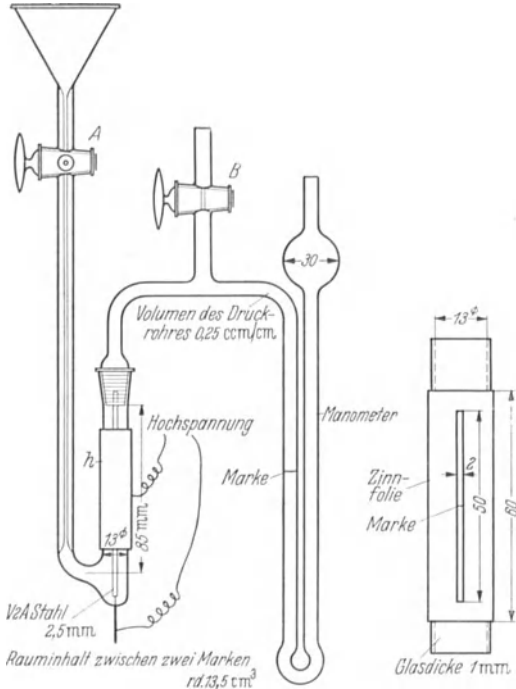


Abb. 104. Bestimmung der Gasaufnahme bzw. -abgabe infolge chemischer und physikalischer Beanspruchung.

**g) Statistische Behandlung der Versuchsergebnisse<sup>1</sup>.**

In vielen Fällen werden mehrere oder auch zahlreiche Proben untersucht bzw. laufend Messungen ausgeführt. Eine statistische Darstellung der Ergebnisse ist dann vorteilhaft, da sie eine leichte Beurteilung der Meßreihen und die Aufdeckung von Beziehungen verschiedener Meßreihen zueinander (Korrelationstheorie) ermöglicht. Die Grundzüge der Statistik sind im folgenden kurz aufgeführt:

1. Darstellung der Versuchsergebnisse. Ermittelt seien Werte der Durchschlagsspannung an gleichen Proben, die im Bereich von 68 bis 77 kV streuen<sup>2</sup>. Dieser Bereich wird in Klassen z. B. von 5 kV Breite,

<sup>1</sup> CZUBER-BURKHARDT: Die statistischen Forschungsmethoden. Wien: L. V. Seidel & Sohn 1938.

<sup>2</sup> PARMELEE, C. W. u. J. O. KRAEHNBUHL: Univ. Illinois Bull. Bd. 32 (1935) Nr. 31.

beginnend mit 57,5 kV, geteilt. Die Klassenmitten sind dann 60, 65 usw. kV unter der Voraussetzung, daß die Anzahl der Durchschläge im Bereich einer Klasse nahezu gleichmäßig verteilt ist. Die Abbildung zeigt vier verschiedene Verfahren der graphischen Darstellung von Versuchsergebnissen. Im Säulendiagramm oder auch Histogramm (Abb. 105 b)

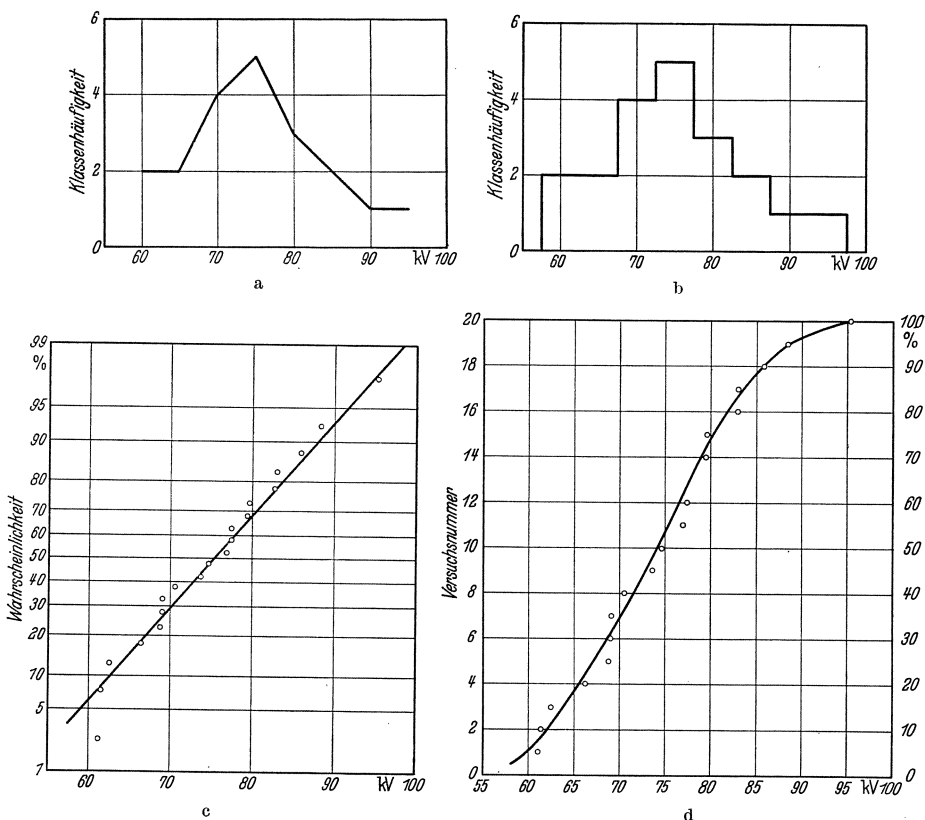


Abb. 105 a bis d. Graphische Darstellung von Versuchsergebnissen: a Säulendiagramm oder Staffeldiagramm, b Häufigkeitspolygon, c Summenpolygon, d arithmetische Wahrscheinlichkeit.

wird über der Klassenmitte als Höhe der Säule die Anzahl der Proben (Klassenhäufigkeit) aufgetragen, die in den Bereich fallen. Wird über der Klassenmitte die Klassenhäufigkeit als Punkt aufgetragen und werden die Punkte durch Geraden verbunden, so erhält man das Häufigkeitspolygon (Abb. 105a). Beide Darstellungen sind nur für eine Wiedergabe zahlreicher Messungen geeignet. Die dritte Darstellung ordnet die Anzahl der Einzelproben, d. h. der Einzelwerte, nach steigenden oder fallenden Eigenschaftswerten, im vorliegenden Beispiel nach der Höhe der Durchschlagsspannung (Abb. 105d). Die Wiedergabe in einem rechtwinkligen



linearen Koordinatensystem ergibt eine Kurve, die annähernd der graphischen Darstellung einer um  $90^\circ$  gedrehten tg-Kurve entspricht. Diese Darstellung zeigt sofort, wieviel Proben unterhalb bzw. oberhalb eines Grenzwertes liegen. Die Ablesung in Prozenten an einer entsprechenden Teilung, z. B. der rechten Ordinatenachse der Abb. 105d, ist möglich, wenn die Summe der untersuchten Proben gleich 100 gesetzt wird. In einer vierten Darstellungsweise (s. Abb. 105c), können die nach steigenden oder fallenden Werten geordneten Ergebnisse unter Verwendung von arithmetischem oder logarithmischem Wahrscheinlichkeitspapier aufgetragen werden. In dieser Wahrscheinlichkeitsdarstellung ist auf der Ordinate mit Wahrscheinlichkeitsteilung die Summenhäufigkeit in Prozenten aufzutragen<sup>1</sup>. Eine normale Verteilung, die der Gaußschen Fehlerfunktion entspricht, ergibt in dieser Darstellung eine gerade Linie. Dieses Verfahren ist besonders bei kleiner Probenanzahl zweckmäßig. Für die aufzutragenden Einzelwerte sind zunächst die Summenhäufigkeiten in Prozenten (Wahrscheinlichkeit) zu errechnen, die sich aus folgender Gleichung ergeben:

$$\underline{N}\% = \frac{2n-1}{2N} \cdot 100,$$

wo  $n$  die Nummer der Beobachtung, d. h. die Nummer der untersuchten Probe und  $N$  die Gesamtzahl der Beobachtungen bedeuten. Diese prozentualen Summenhäufigkeiten oder Wahrscheinlichkeiten für 4 bis 50 Einzelwerte sind in Tabelle 17 zusammengestellt. Sie umfassen die in der Isolierstofftechnik üblicherweise vorkommende Anzahl von Versuchen.

Die größte Bedeutung, physikalisch wie auch statistisch, besitzt der Mittelwert. Er ist gleich  $\frac{\sum_{m=1}^n a_m}{n}$ . Außer dem Mittelwert ergibt sich aus der statistischen Darstellung der Versuchsergebnisse durch ein Stufendiagramm oder einen Polygonzug der häufigste Wert (Häufigkeitswert), und schließlich läßt sich ebenfalls aus der graphischen Wiedergabe der Versuchsergebnisse ein Zentralwert ermitteln, der in der graphischen Darstellung dem Punkt entspricht, der die Anzahl der Beobachtungen halbiert. Im Falle einer geradzahligem Anzahl von Beobachtungen ist der Zentralwert nicht definiert. Ebenso ist der häufigste Wert mathematisch nicht exakt erfaßt. In der normalen Fehlerverteilungsfunktion fallen Mittelwert, häufigster Wert und Zentralwert in einem Punkt zusammen. Der häufigste Wert kann nach folgender Gleichung errechnet werden:

$$\text{Häufigster Wert} = \text{Mittelwert} - 3 \times (\text{Mittelwert} - \text{Zentralwert}).$$

<sup>1</sup> Papiere mit Wahrscheinlichkeitsteilungen liefert die Firma Carl Schleicher & Schüll.





Tabelle 17.

	27	26	25	24	23	22	21	20	19	18	17	16
1	1,85	1,92	2,00	2,08	2,17	2,27	2,38	2,50	2,63	2,78	2,94	3,13
2	5,56	5,77	6,00	6,25	6,52	6,82	7,14	7,50	7,89	8,33	8,82	9,38
3	9,26	9,62	10,00	10,42	10,87	11,36	11,91	12,50	13,16	13,89	14,71	15,63
4	12,96	13,46	14,00	14,58	15,22	15,91	16,67	17,50	18,42	19,44	20,59	21,88
5	16,67	17,31	18,00	18,75	19,57	20,45	21,43	22,50	23,68	25,00	26,47	28,13
6	20,37	21,15	22,00	22,92	23,91	25,00	26,19	27,50	28,95	30,56	32,35	34,38
7	24,07	25,00	26,00	27,08	28,26	29,55	30,95	32,50	34,21	36,11	38,24	40,63
8	27,78	28,85	30,00	31,25	32,61	34,09	35,71	37,50	39,47	41,67	44,12	46,88
9	31,48	32,69	34,00	35,42	36,96	38,64	40,48	42,50	44,74	47,22	50,00	53,13
10	35,19	36,54	38,00	39,58	41,30	43,18	45,24	47,50	50,00	52,78	55,88	59,38
11	38,89	40,38	42,00	43,75	45,65	47,73	50,00	52,50	55,26	58,33	61,77	65,63
12	42,59	44,23	46,00	47,92	50,00	52,27	54,76	57,50	60,53	63,88	67,65	71,88
13	46,30	48,08	50,00	52,08	54,35	56,82	59,52	62,50	65,79	69,44	73,53	78,13
14	50,00	51,92	54,00	56,25	58,70	61,36	64,29	67,50	71,05	75,00	79,41	84,38
15	53,70	55,77	58,00	60,42	63,04	65,91	69,05	72,50	76,32	80,56	85,29	90,63
16	57,41	59,62	62,00	64,58	67,39	70,45	73,81	77,50	81,59	86,11	91,18	96,88
17	61,11	63,46	66,00	68,75	71,74	75,00	78,57	82,50	86,84	91,67	97,06	
18	64,81	67,31	70,00	72,92	76,09	79,55	83,33	87,50	92,11	97,22		
19	68,52	71,15	74,00	77,08	80,43	84,09	88,10	92,50	97,37			
20	72,22	75,00	78,00	81,25	84,78	88,64	92,86	97,50				
21	75,93	78,85	82,00	85,42	89,13	93,18	97,62					
22	79,63	82,69	86,00	89,58	93,48	97,73						
23	83,33	86,54	90,00	93,75	97,83							
24	87,04	90,38	94,00	97,92								
25	90,74	94,23	98,00									
26	94,44	98,08										
27	98,15											

Aus der Darstellung der Abb. 105c sind für die untersuchte Sorte A folgende allgemeinen Ergebnisse sofort zu entnehmen:

1. Der Mittelwert, der Häufigkeitswert und der Zentralwert fallen auf einen Punkt bei 75 kV. Die gerade Linie stellt eine normale Fehlerverteilung dar. Der Mittelwert ist je nach der graphischen Angleichung der Geraden an die Meßpunkte ein wenig veränderlich.

2. Von 10 Messungen liegt ein Wert unterhalb 59 kV und ein Wert oberhalb von 87,5 kV. Durch Verlängerung der geraden Linie ist es möglich, eine Aussage über die Anzahl von Proben in Prozenten zu treffen, die unter oder über gewissen Grenzwerten liegen. Dies ist ganz besonders wichtig, wenn auf Grund derartiger Versuche Abnahmebedingungen, *Mittelwerte oder Mindestwerte*, festgelegt werden sollen.

3. 50% aller Proben haben Festigkeitswerte zwischen 68 und 73 kV. Die Neigung der Geraden gibt ein Maß für die Gleichmäßigkeit der untersuchten Proben.

Für die Beurteilung der Güte und Gleichmäßigkeit der Erzeugnisse aller Art ist die statistische Auswertung einer nicht zu kleinen Anzahl von

(Fortsetzung.)

15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	
3,33	3,57	3,85	4,17	4,55	5,00	5,56	6,25	7,14	8,33	10,00	12,50	1
10,00	10,71	11,54	12,50	13,64	15,00	16,67	18,75	21,43	25,00	30,00	37,50	2
16,67	17,86	19,23	20,83	22,73	25,00	27,78	31,25	35,71	42,67	50,00	62,50	3
23,33	25,00	26,92	29,17	31,82	35,00	38,89	43,75	50,00	58,33	70,00	87,50	4
30,00	32,14	34,62	37,50	40,91	45,00	50,00	56,25	64,29	75,00	90,00		5
36,67	39,29	42,31	45,83	50,00	55,00	61,11	68,75	78,57	91,67			6
43,33	46,43	50,00	54,17	59,09	65,00	72,22	81,25	92,86				7
50,00	53,57	57,69	62,50	68,18	75,00	83,33	93,75					8
56,67	60,71	65,38	70,83	77,27	85,00	94,44						9
63,33	67,86	73,08	79,17	86,36	95,00							10
70,00	75,00	80,77	87,50	95,46								11
76,67	82,14	88,46	95,83									12
83,33	89,29	96,15										13
90,00	96,43											14
96,67												15

Versuchsergebnissen die einzig mögliche Grundlage. Die bisher festgelegten Mittel- oder Mindestwerte allein geben kein zuverlässiges Bild. Derartige Prüfbedingungen werden unter Umständen auch von solchen Fabrikationsserien erfüllt, die eine große Anzahl nichtvollwertiger Isolierstoffe enthalten<sup>1</sup>.

### 3. Mechanische Prüfungen.

#### a) Maß und Gewicht.

**Dicke.** Besondere Vorschriften über Dickenmessungen an festen Isolierstoffen finden sich nur vereinzelt. So schreibt z. B. VDE 0332 für die Dickenmessung bei *Glimmer*-Erzeugnissen vor, daß bei Kommutator-Mikanit die Dicke über die ganze Fläche des doppelseitig geschliffenen Mikanits mittels eines Mikrometers mit einer Meßfläche von 5 mm Dmr. zu messen sei, dgl. bei Form-Mikanit.

Zum Messen der Dicke von Mikanit-Lamellen in gepreßtem Zustand sollen mindestens 20 Lamellen übereinander geschichtet und mit 200 kg/cm<sup>2</sup> gedrückt werden.

<sup>1</sup> O'DEA, W. T.: J. Instn. electr. Engrs. Bd. 83 (1938) S. 333.

Bei der Mehrzahl der festen Isolierstoffe bereitet die Messung der Dicke mit den üblichen Mikrometerschrauben keine besonderen Schwierigkeiten, zumal die für die Festigkeitsversuche notwendige Genauigkeit selten unter 0,01 mm heruntergeht. Lediglich bei sehr weichen Stoffen, wie z. B. *Weichgummi*, kann es notwendig werden, an Stelle der mechanischen Messung mittels Mikrometerschrauben (vgl. S. 184), bei denen ein Mindestanpreßdruck beim Messen notwendig und damit eine Verformung an der Meßstelle schwer vermeidbar ist, zur optischen Messung mittels Meßmikroskop zu greifen. Für Querschnittsbestimmungen von Gummirohren, z. B. von Gummihüllen isolierter Leitungen hat sich das Tauchverfahren<sup>1</sup> bewährt und ist der mikroskopischen Querschnittsbestimmung überlegen.

Zur schnellen Messung der Dicke *fester Isolierstoffe* im Bereich von 0,05 bis 5 mm mit 1 bis 2% Genauigkeit eignen sich elektrische Meßverfahren<sup>2</sup>, z. B. mittels der „Schichtlehre“<sup>3</sup>. Dabei wird die zu messende Probe auf eine ferromagnetische Unterlage (Eisen) gelegt und mit dem Meßkopf der Schichtlehre abgetastet. In dem Meßkopf befindet sich eine Induktionsspule, deren Selbstinduktion durch den Abstand Meßkopf/Eisen, also durch die Probendicke gegeben ist.

**Dichte und Wichte.** Die Ermittlung des *Raumgewichtes* oder *scheinbaren spezifischen Gewichtes* oder *Wichte*, d. h. des Verhältnisses Gewicht zum Volumen, gegeben durch die äußeren Abmessungen, bietet bei regelmäßig geformten Prüfkörpern keine Schwierigkeiten, da das Volumen leicht durch Ausmessen, das Gewicht durch Wägung bestimmt werden kann. Bei unregelmäßig gestalteten Prüfkörpern wird man das gleichfalls leicht zu handhabende Schwebeverfahren<sup>4</sup> vorziehen. Häufig wird man sich bei der Wichte-Bestimmung begnügen können, die zweite Dezimale noch genau zu ermitteln, zumal die Wichte ohne ergänzende Untersuchungen zur Isolierstoff-Beurteilung kaum verwertbar ist. Dagegen kann die Wichte in Verbindung mit der *Dichte*, d. h. dem wahren spezifischen Gewicht, wertvollen Aufschluß über Gefügeeigenarten oder Gefügemängel geben, da

$$\left(1 - \frac{\text{Wichte}}{\text{Dichte}}\right) \cdot 100$$

die *Porosität* in Prozenten angibt. Die Dichtebestimmung erfolgt dabei nach bekannten Verfahren der technischen Physik<sup>4</sup>.

<sup>1</sup> RICHTER, E. F.: Elektrizitätswirtsch. Bd. 37 (1938) S. 336.

<sup>2</sup> Vgl. u. a.: Bull. Amer. ceram. Soc. Bd. 14 (1935) S. 365. — Gen. Electr. Rev. Bd. 35 (1932) S. 139; Bd. 42 (1939) S. 486. — Mech. Engng. Bd. 59 (1937) S. 653.

<sup>3</sup> Hersteller: Techn.-physik. Werkstätten, Berlin N 65.

<sup>4</sup> Vgl. u. a. KOHLRAUSCH: Lehrbuch der praktischen Physik. Wien: J. B. Teubner.

**Porosität.** Zur unmittelbaren Bestimmung des Porenvolumens in porösen Stoffen eignen sich unter anderem die in den amerikanischen Vorschriften für *keramische Stoffe* aufgenommenen Verfahren:

Zur Bestimmung der Porosität *keramischer Isolierstoffe* sehen die amerikanischen Vorschriften zwei Verfahren vor. Das erste Verfahren ist anwendbar für *stark poröse* Stoffe; Maßstab für die Porosität ist hierbei die Wasseraufnahme (Beschreibung des Verfahrens s. S. 270).

Das zweite Verfahren eignet sich für *wenig poröse* keramische Stoffe, deren Wasseraufnahme geringer als 0,1% ist. Bei diesem Verfahren wird das **Porenvolumen** aus der in einer Probe mit bekanntem Volumen enthaltenen Luftmenge bestimmt:

Als Probe werden Bruchstücke mit insgesamt mindestens  $50 \text{ cm}^3$  Volumen verwendet. Der Anteil der Bruchflächen an der Gesamtoberfläche soll 50% übersteigen. (Dieser Anteil müßte für Porositätsbestimmungen jedoch wesentlich höher festgesetzt werden.)

Für die Bestimmung wird das McLEOD-Porosimeter nach Abb. 106 benutzt. Das Gerät muß vor dem Versuch auf Luftdichtigkeit aller Verbindungen und des Hahnes sowie auf Trockenheit geprüft werden.

Dazu ist der Hahn zu öffnen, das Quecksilbergefäß zu heben, bis das Quecksilber den Hahn erreicht hat, darauf der Hahn zu schließen, das Gefäß bis unter den Probenbehälter zu senken zur Erzeugung eines Vakuums und dann wieder bis zur Hahnhöhe zu heben. Dabei muß das Quecksilber in der Kapillare bis zum Hahn steigen, sofern das Gerät dicht und trocken ist.

Nach dieser Vorprüfung wird das Quecksilbergefäß bei geöffnetem Hahn gesenkt, die Flanschverbindung (fetten!) gelöst, die Probe in den Behälter gefüllt, die Verbindung geschlossen, das Quecksilbergefäß gehoben, bis das Quecksilber den Hahn erreicht hat, der Hahn geschlossen, das Gefäß bis unter den Behälter gesenkt, die Probe mindestens 1 min im Vakuum gelassen und das Gefäß so weit gehoben, daß die Quecksilberspiegel im Gefäß und in der Kapillare im selben Niveau liegen. Das Luftvolumen  $v$  in der Kapillare wird abgelesen. Dieses bei normalem Luftdruck gemessene Volumen  $v$  entspricht dem Porenvolumen der Probe. Zur Berechnung des Porenvolumens in Prozenten des Gesamtvolumens  $V$  der Probe ist  $V$  in geeigneter Weise auf  $0,2 \text{ cm}^3$  genau zu bestimmen.

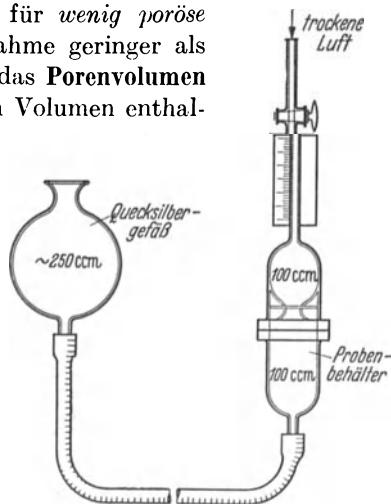


Abb. 106. Skizze des McLEOD-Porosimeters für keramische Isolierstoffe. (Aus A. S. T. M. D 1 16-34.)

Dann ist

$$\text{Porenvolumen in Prozenten} = \frac{v}{V} \cdot 100.$$

Aus mindestens 5 Einzelbestimmungen ist das Mittel zu bilden.

**Rauhigkeit der Oberflächen**<sup>1</sup>. Eine Nadel wird unter einem Winkel von etwa 80° gegen die Horizontale auf die Prüffläche aufgesetzt. Durch eine Geradföhrung wird die Nadel durch die Unebenheiten der Oberfläche in Schwingungen versetzt. Diese Schwingungen werden auf das eine Ende eines Rochelle-Kristalls (Kalium-Natrium-Tartrat) übertragen, während das andere Ende fixiert ist. Die im Kristall entstehenden piezoelektrischen Schwingungen werden verstärkt und aufgezeichnet. Sie sind ein Maß für die Glätte der Oberfläche.

### b) Zugversuch.

Der Zugversuch ist die Grundlage aller Festigkeitsuntersuchungen. Er gibt Aufschluß über die wichtigsten mechanischen Eigenschaften — Spannung, federnde und bleibende Formänderung, Arbeitsaufnahme, Nachwirkungserscheinungen —, so daß aus dem Zugversuch bei sachgemäßer, dem Isolierstoff angepaßter Ausführung sich das Verhalten des Stoffes als Baustoff mit ziemlicher Zuverlässigkeit beurteilen ließe. Allerdings erfordert eine solche Ausführung einen Zeitaufwand, der im allgemeinen mit den Bedürfnissen der Elektrotechnik nicht in Einklang zu bringen ist. Man begnügt sich daher mit der einfachsten Art der Ausführung des Zugversuches und ergänzt ihn durch leicht auszuföhrende weitere mechanische Prüfungen, wie den Biege-, Druck- oder Schlagversuch.

In der üblichen rohen Ausführung als „Zerreißversuch“ wird der Probestab bei meist hoher Geschwindigkeit der Prüfmaschine zerrissen. Dabei wird die Höchstlast  $P$  beobachtet. Auf den Anfangsquerschnitt  $F_0$  des Stabes bezogen erhält man die

$$\text{Zugfestigkeit } \sigma_{zB} = \frac{P}{F_0} \text{ oder kurz „Festigkeit“}.$$

Der Stab erföhrt während des Zugversuchs eine Verlängerung  $\Delta l$ , die zwischen zwei auf dem Stab im Abstand  $l$  („Meßlänge“) angebrachten Marken gemessen wird. Die spezifische Verlängerung heißt  $\varepsilon = \frac{\Delta l}{l}$  und wird als *Dehnung*  $\delta_n$  in Prozenten der Meßlänge angegeben, so daß

$$\delta_n = \frac{\Delta l}{l} \cdot 100$$

ist. Der Index  $n$  gibt das Verhältnis von Meßlänge zum Durchmesser  $d$  eines Kreises wieder, der dem Anfangsquerschnitt  $F_0$  flächengleich ist:

$$n = \frac{l}{d} = 0,885 \frac{l}{\sqrt{F_0}} = 0,885 \cdot x,$$

<sup>1</sup> Engineering Bd. 147 (1939) S. 699. — Mech. Engng. Bd. 60 (1938) S. 752.



wenn mit  $x$  das Verhältnis  $l/\sqrt{F_0}$  bezeichnet wird. Die Angabe von  $n$  ist wichtig, da von diesem Verhältnis die Größe von  $\delta$  abhängig ist. Dehnungsangaben können also nur dann verglichen werden, wenn  $n$  bekannt ist.

Meist werden nur Zugfestigkeit  $\sigma_z B$  und Bruchdehnung  $\delta_n$  ermittelt, wenngleich diese Zahlen über den Wert des Stoffes nur wenig aussagen. Schon aufschlußreicher ist die Aufzeichnung des Spannungs-Dehnungs-Schaubildes, das charakteristisch für die einzelnen Stoffgruppen ist (vgl. Abb. 107). Dabei sei bemerkt, daß unter „Spannung“ die Belastung bezogen auf den Querschnitt zu verstehen ist. (Eine Probe von  $1 \text{ cm}^2$  Querschnitt, mit  $1 \text{ kg}$  auf Zug beansprucht, erfährt eine „Spannung“ von  $1 \text{ kg/cm}^2$ .) Da der Querschnitt während des Zugversuchs kleiner wird (Verjüngung bei zunehmender Dehnung) und während des Versuchs nur schwierig meßbar ist, bezieht man die Last meist auf den Anfangsquerschnitt.

In Abb. 107 sind schematisch die Spannungs-Dehnungs-Kurven für Kunstharz-Preßstoffe (I) als Stoffe mit sehr geringer Formänderung (Dehnung) und kleiner Arbeitsaufnahme, gegeben durch die schraffierte Fläche, dargestellt, ferner für Polymerisate mit Weichmacher (II), gekennzeichnet durch verhältnismäßig große Formänderung und einer Bruchspannung  $\otimes$ , die unter der Höchstspannung  $+$  liegen kann (durch Fließen des Stoffes vor dem Bruch), und für Weichgummi (III), bei dem sehr große Formänderung und sehr große Arbeitsaufnahme charakteristisch sind.

Aufschlußreich für das Verhalten der Stoffe bei kleinen Zugbeanspruchungen, d. h. in dem Gebiet, in welchem meist die Dehnung proportional der Spannung verläuft, die Kurve also, ausgehend von 0, noch eine Gerade ist, ist die Neigung der Kurve. Die Neigung ist bestimmt durch das Verhältnis

Spannung : Dehnung.

Je größer das Verhältnis, je steiler also die Kurve, um so „steifer“ oder „strammer“ ist der Stoff; denn um eine bestimmte Formänderung zu erzielen, muß eine verhältnismäßig hohe Zugspannung ausgeübt werden. Bei Weichgummi (III) dagegen genügt eine geringe Spannung, um verhältnismäßig hohe Dehnungen zu erzeugen.

Als Maß für das Verhältnis Spannung: Dehnung dient der

„Elastizitätsmodul“ ( $E$ -Modul),

der in  $\text{kg/cm}^2$  die Spannung angibt, die eine Dehnung von 100% erzeugt. Da die meisten Stoffe zu Bruch gehen, bevor sie 100% Dehnung erreichen,

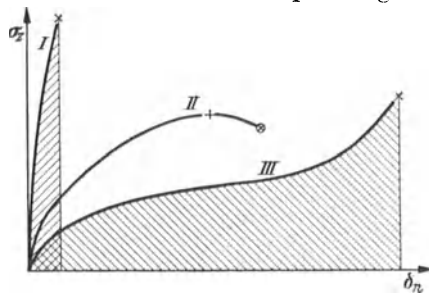


Abb. 107. Spannungs-Dehnungsschaubilder.  
I Kunstharz-Preßstoffe aus härtbaren Kunstharzen; II Polymerisate mit Weichmacher;  
III Vulkanisate aus Naturkautschuk.

oder aber vorher schon nicht mehr Proportionalität zwischen Spannung und Dehnung aufweisen, muß die Messung bei sehr kleinen Spannungen erfolgen. Das setzt bei Stoffen mit geringer Dehnung umständliche Feinmeßapparate voraus, so daß man den  $E$ -Modul gewöhnlich aus dem Biegeversuch ermittelt (vgl. S. 203).

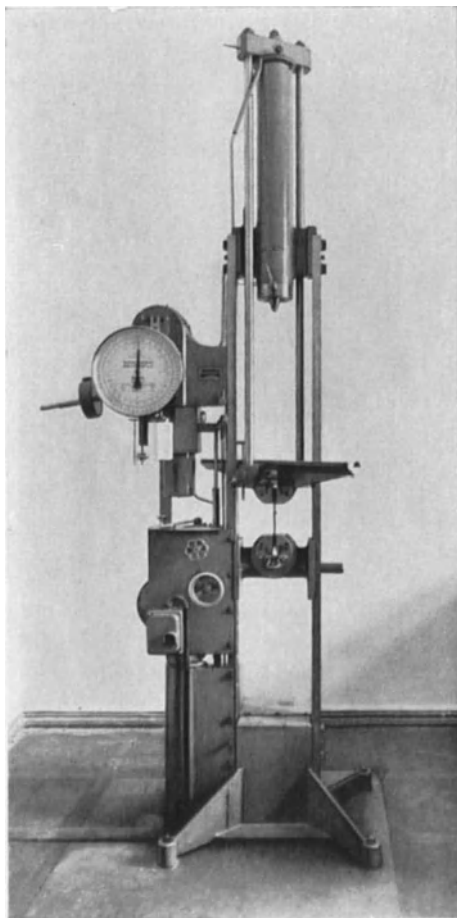


Abb. 108. Universal-Prüfgerät für Zug-, Druck- und Biegeversuche mit 5 Meßbereichen (0,3, 0,6, 1,2, 3 und 6 t).

Wenn der Zugversuch bei Isolierstoff - Untersuchungen verhältnismäßig selten ausgeführt wird, so liegt dies daran, daß bei *spröden, wenig formänderungsfähigen* Stoffen wie etwa bei keramischen Isolierstoffen, und bei manchen Kunstharz - Preßstoffen, die Forderung reiner Zugspannungen, also die Erzielung des einachsigen Spannungszustandes ohne zusätzliche Spannungen sich nur schwierig verwirklichen läßt. Denn aus diesen Stoffen lassen sich spanlos nur bei Beachtung besonderer Sorgfalt Zugstäbe herstellen, die keiner Nachbearbeitung mehr bedürfen. Ist Nacharbeit notwendig, so können dadurch bereits Gefüge- und Querschnittstörungen und somit Beeinträchtigung der Ergebnisse die Folge sein. Außerdem sind in Anbetracht der geringen Formänderung dieser Stoffe (Bruchdehnung meist unter 1%) schädliche zusätzliche Spannungen beim Einspannen der Stäbe kaum vermeidbar.

Will man ferner den Spannungs-Dehnungsverlauf bis zum Bruch bei diesen Stoffen zuverlässig messen, so sind Feinmessungen notwendig. Diese Umständlichkeit und Erschwerung des Versuches hat dazu geführt, daß für spröde Stoffe der Biegeversuch vorgezogen wird, wengleich die Spannungsverteilung dort nicht so eindeutig wie beim Zugversuch ist. Andererseits hat für *stark formänderungsfähige* Stoffe, wie z. B. für Weichgummi, der Zug-

versuch den Nachteil, daß stabförmige Proben leicht aus der Einspannung vor Erreichen der Bruchgrenze gleiten, und daß andererseits bei ringförmigen Proben (s. S. 183) die Probenherstellung Sondereinrichtungen voraussetzt und die Ergebnisse durch zusätzliche Spannungen beim Versuch getrübt werden. Für diese Stoffe hat der Zugversuch seine Bedeutung jedoch beibehalten, da hier ein Ersatz durch andere, einfacher auszuführende Prüfungen nicht möglich ist.

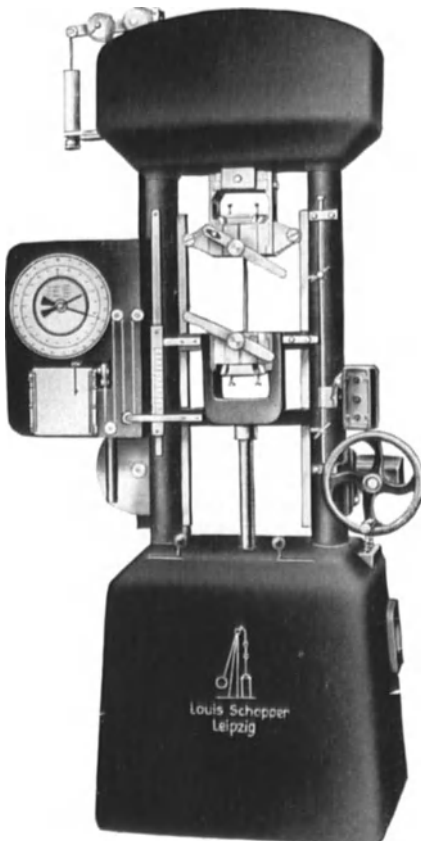


Abb. 109. Zugfestigkeitsprüfmaschine mit 3 Meßbereichen (0,2, 1, 2 t).

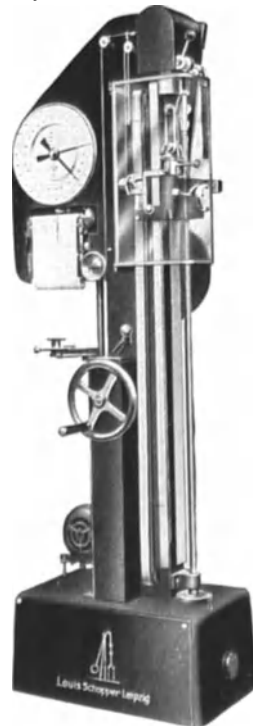


Abb. 110. Zugfestigkeitsprüfmaschine für Weichgummi („Kautschukprüfer“) mit 3 Meßbereichen (50, 100, 250 kg).

**Prüfgeräte.** Als Prüfgeräte zur Durchführung des Zugversuches an Isolierstoffen mit ihren sehr starken Festigkeitsunterschieden eignen sich am besten Universal-Prüfmaschinen mit mehreren Meßbereichen. Abb. 108 zeigt eine derartige Maschine, Bauart Mohr & Federhaff, geeignet für Zug-, Druck- und Biegeversuche mit 5 Meßbereichen: 0 bis 300, 600, 1200, 3000 und 6000 kg, Abb. 109 eine andere, Bauart Schopper, mit 3 Meßbereichen: 0 bis 200, 1000 und 2000 kg. Für Zugversuche an sehr formänderungsfähigen Stoffen wie z. B. Weichgummi, bei dem Dehnungen

bis zu 1000% auftreten können, sind Sonderausführungen zweckmäßig, wie z. B. der Kautschuk-Prüfer, Bauart Schopper-Dalén, mit 3 Meßbereichen (0 bis 50, 100, 250 kg) (Abb. 110). Alle Maschinen sind mit Schaulinienzeichnern ausgerüstet, die während des Zugversuches das Spannungs-Dehnungs-bild selbsttätig aufzeichnen.

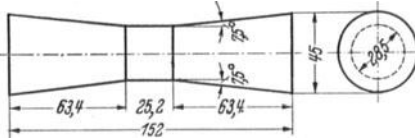


Abb. 111. Amerikanischer Probekörper zur Bestimmung der Zugfestigkeit keramischer Isolierstoffe. (A. S. T. M. D 116—34.)

nach DIN 1604 eine amtliche Prüfung<sup>1</sup> nach Aufstellung der Maschinen durchzuführen.

**Versuchsausführung.** Die Ausführung des Zugversuches ist abhängig von der Art des Isolierstoffes. Einen guten Einblick geben die bisher im In- und Ausland veröffentlichten Vorschriften, von denen einige besonders charakteristische im folgenden beschrieben werden.

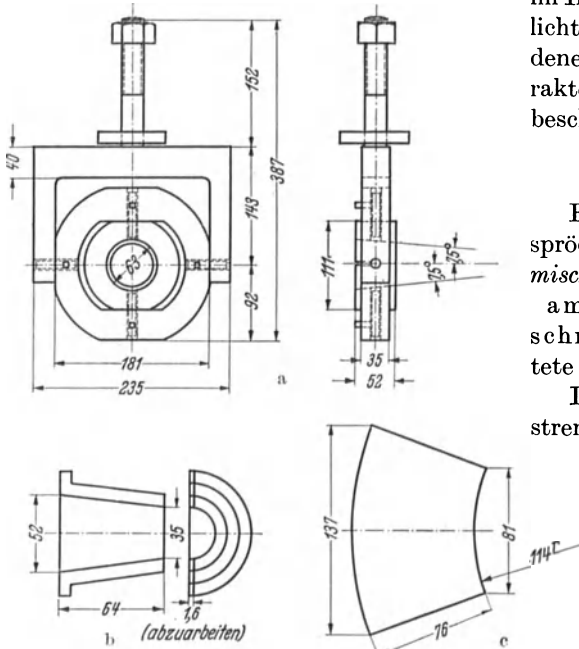


Abb. 112 a bis c. Griffe (a), geteilter Ring (b) und Löschpapierzwischenlage (c) für den Zugversuch an keramischen Isolierstoffen. (A. S. T. M. D 116—34.)

benutzt werden, welche zusätzliche Spannungen beim Versuch weitgehend vermeiden. Die Geschwindigkeit der oberen Einspann-Vorrichtung soll

#### Keramische Stoffe.

Für die härtesten und sprödesten Stoffe, die *keramischen Stoffe*, sind in den amerikanischen Vorschriften gut durchgearbeitete Ausführungen gemacht.

Die Zugfestigkeit (tensile strength<sup>2</sup>) wird an einem Zugstab nach Abb. 111 ermittelt (Herstellung s. S. 54).

Mindestens 5 Proben werden bei Raumtemperatur geprüft, wobei zweckmäßig die in Abb. 112 a—c, 113 a, b dargestellten Griffe und Einspannvorrichtungen

<sup>1</sup> Z. B. seitens des Staatlichen Materialprüfungsamtes Berlin-Dahlem.

<sup>2</sup> A. S. T. M. D 116—34, 2/6.

so sein, daß die Last genau gemessen werden kann. Diese Angabe ist jedoch zur Festlegung der Geschwindigkeit unzureichend.

Im Prüfungsergebnis sind die bei Isolierpreßstoffen geforderten Angaben zu machen (s. S. 186), ferner sind die Einzelwerte der Zugfestigkeit beim Bruch  $\sigma_{zB}$  — geordnet nach steigender Größe — in Kurvenform einzutragen (s. S. 168).

Deutsche Vorschriften (VDE) sind in Vorbereitung; voraussichtlich wird als Probe ein Drehkörper ähnlich Abb. 111, aber ohne

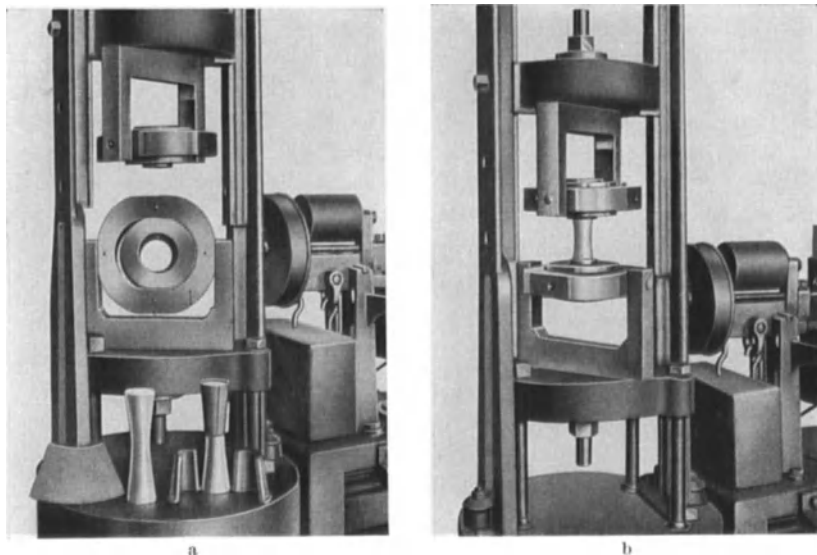


Abb. 113 a und b. Anordnung der Griffe und Probe beim amerikanischen Zugversuch an keramischen Isolierstoffen mit Griffen, Probe, geteiltem Ring und Löschpapierzwischenlage. a vor, b nach dem Einbau. (A.S.T.M. D 116—34.)

zylindrischen Mittelteil verwendet werden (76 mm lang, 20 mm Dmr. in der Mitte, 40 mm Dmr. an den Stirnflächen).

#### *Lackleinen.*

Für Isolierstoffe dieser Art sind für den Zugversuch in den französischen Vorschriften<sup>1</sup> Angaben enthalten. Der Zugversuch an Lackleinen erstreckt sich auf Ermittlung der Zugfestigkeit und Dehnung vor und nach künstlicher Alterung und Öllagerung, wobei die Richtungsabhängigkeit berücksichtigt wird. (*Résistance à la rupture, résistance à l'allongement, action des agents extérieurs.*)

Je drei 20 × 200 mm<sup>2</sup> große Proben werden in Kett- und Diagonalrichtung (40° bis 50° zur Kettrichtung) entnommen; nur die Diagonalproben werden auf Dehnung geprüft.

<sup>1</sup> U.S.E. 1937/38—52, S. 1061.

Der Zugversuch wird bei gleichmäßiger Dehnungsgeschwindigkeit (Abstandsänderung der Einspannungen: 1 cm/15 s) ausgeführt bis zum Bruch der Probe. Die Bruchlast wird in centisthènes<sup>1</sup> gemessen und auf 1 cm Probenbreite bezogen.

Die Dehnung wird nur an den Diagonalproben gemessen (Meßlänge 100 mm). Beobachtet wird die Dehnung, bei der der Lack zu reißen beginnt (Beobachtung mittels Lupe im durchfallenden Licht) sowie die Dehnung beim Bruch der Probe.

Die Bruchlast wird außerdem bestimmt:

- a) Nach 8tägiger Lagerung der Proben in Luft bei 110° C.
- b) Nach 8tägiger Lagerung in Transformatorenöl bei 110°.

Nach den deutschen Vorschriften (VDE 0315) werden die Proben (je fünf 15 × 250 mm<sup>2</sup> große Streifen aus Längs- und Querrichtung) zunächst bei 15 bis 25° und 65 % relativer Feuchtigkeit mindestens 24 h gelagert, anschließend in Probenmitte vorgefalzt (Biegen über einem Stück gleicher Dicke, Überwalzen der Biegestelle von Hand, nochmaliges Biegen in entgegengesetzter Richtung mit anschließendem Walzen) und mit 180 mm freier Probenlänge auf Zugfestigkeit geprüft.

#### *Preßspan.*

Der Zugversuch an Preßspan nach den französischen Vorschriften<sup>2</sup> dient hauptsächlich zur Beurteilung der Wirkung mechanischer oder chemischer Beanspruchungen. Bestimmt wird die *Zugfestigkeit*:

a) Nach Lagerung in Luft von 65 % relativer Feuchtigkeit. Je fünf 20 × 200 mm<sup>2</sup> große Proben werden längs und quer zur Faserichtung entnommen, 24 h bei 65 % relativer Feuchtigkeit gelagert und spätestens 3 min nach der Lagerung mit gleichmäßiger Laststeigerung bis zum Bruch geprüft; die Dehnungsgeschwindigkeit (Abstandsänderung der Einspannbacken) soll 1 cm/15 s betragen. Die Bruchspannung wird in „myriapièzes“<sup>3</sup> angegeben.

b) Nach Falten. Bei Dicken bis zu 0,5 mm wird über die Biegung einer lose zusammengefalteten 200 × 200 mm<sup>2</sup> großen Probe ein 2 kg schwerer gußeiserner Zylinder (70 mm Höhe, 70 mm Dmr.) gerollt. Bei Dicken über 0,5 bis 0,8 mm wird die Probe im rechten Winkel über einen Dorn von 3 mm Dmr. gebogen, bei Dicken über 0,8 bis 1,0 mm über einen Dorn von 5 mm Dmr. Die in dieser Weise gefalteten Proben werden in 20 × 200 mm<sup>2</sup> große Streifen geschnitten, die dann nach a) geprüft werden.

c) Nach Öleinwirkung und Falten. 150 × 150 mm<sup>2</sup> große Proben werden 3 Tage bei 110° in Transformatorenöl gelagert und anschließend nach b) und a) geprüft.

<sup>1</sup> 1 centisthène (csn) = 0,01 sthène, 1 kg = 0,98 csn.

<sup>2</sup> U.S.E. 1937/38—51, S. 1052.

<sup>3</sup> 1 myriapièze (mapz) = 10000 pièzes, 1 kg/mm<sup>2</sup> = 0,98 mapz.

*Weichgummi und weichgummiartige Kunststoffe.*

Der Zugversuch an *Weichgummi* wird in Deutschland nach DIN DVM 3504 ausgeführt. Das Verfahren ist auch anwendbar für weichgummiartige Kunststoffe (z. B. Buna), sofern Dehnung und elastisches Verhalten etwa dem Weichgummi entsprechen.

Als Probekörper werden verwendet:

- a) Ringe. 

Großer Normring R I	}	vgl. Abb. 114
Kleiner Normring R II		
Außendurchmesser bei R I	$d_a = 52,6$ mm	
	bei R II $d_a = 44,6$ mm	
Innendurchmesser bei R I	$d_i = 44,6$ mm	
	bei R II $d_i = 36,6$ mm	
Bei R I und R II Dicke	$s = 6,0$ mm	
Breite	$b = 4,0$ mm	
Tragender Querschnitt	$= 0,480$ cm <sup>2</sup>	
Meßlänge $\frac{d_i \cdot \pi}{2}$ bei R I	$= 70,0$ mm	
	bei R II $= 57,5$ mm	

b) *Stäbe*. Vorgesehen sind drei Normstäbe St I, St II, St III; Form und Abmessungen siehe Abb. 115; die Dicke  $s$  soll möglichst kleiner als 3 mm sein.

In allen Fällen, wo die Proben aus Fertigerzeugnissen mit geringerer Dicke als 6 mm herauszuarbeiten sind (z. B. aus gummiisolierten Leitungen), ist man gezwungen, eine der Stabformen zu wählen, während bei

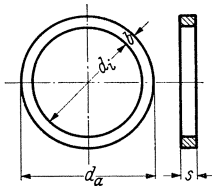


Abb. 114. Normring als Probekörper für Zugversuch an Weichgummi. (DIN DVM 3504.)

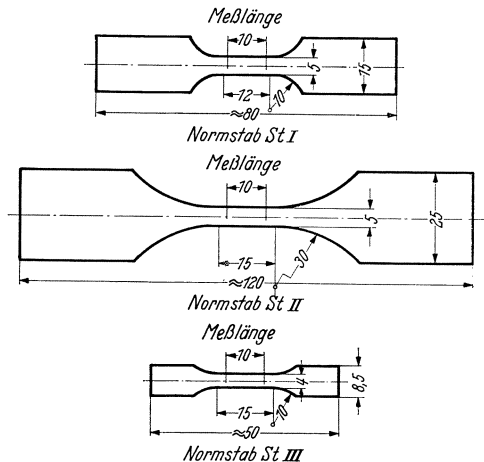


Abb. 115. Normstäbe St I, St II, St III als Probekörper für Zugversuch an Weichgummi. (DIN DVM 3504.)

besonderer Probenherstellung aus Mischungen die bewährte Ringform vorzuziehen sein dürfte. Die Probekörper werden aus besonders gefertigten vulkanisierten Platten (bei Ringen 6 mm dicke Platten) oder aus Fertigerzeugnissen herausgestanzt mittels besonderer Formmesser (Abb. 116).

Beim Ausmessen der Proben sind Meßuhren mit Tasterfläche von 5 mm Dmr. und 50 g Meßdruck zu verwenden.

Der Versuch soll frühestens 3 Tage nach dem Vulkanisieren bei  $20 \pm 2^\circ \text{C}$  und gleichbleibender Dehngeschwindigkeit von 400 bis 500% der Meßlänge je min ausgeführt werden.

Bei Ringen ist der Versuch nach SCHOPPER-DALÉN<sup>1</sup> auszuführen (vgl. Abb. 110), bei welchem der Ring über 2 Rollen gelegt wird, die die sonst übliche Einspannung ersetzen.

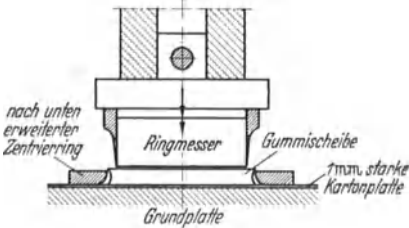


Abb. 116. Herstellen von Normringen aus Weichgummi durch Stanzen. (Aus MEMMLER: Handbuch der Kautschukwissenschaft, S. 593.)

Beide Rollen sind drehbar, wobei die untere Rolle beim Versuch durch Zahntrieb zwangsläufig gedreht wird. Der Ring wandert also, während er seine Länge ändert, über die Rollen, wodurch eine gleichmäßige Dehnung auf seinem ganzen Umfang erreicht wird. Daher kann die Dehnung unmittelbar an der Maschine abgelesen werden.

Bei Stäben dagegen wird die Dehnung mit einem Taster mit abgestumpften Spitzen an den beiden Marken, die die Meßlänge begrenzen, verfolgt.

Anzugeben sind:

Zugfestigkeit in  $\text{kg}/\text{cm}^2$ ,

Bruchdehnung in Prozent der ursprünglichen Meßlänge,

Probenform (bei Normstäben auch die Dicke).

#### Harte Kunststoffe.

Für harte Kunststoffe, insbesondere Kunstharz-Preßstoffe, ist in den deutschen VDE-Vorschriften der Zugversuch nur für die Prüfung geschichteter Stoffe vorgesehen, während für nichtgeschichtete der Zugversuch nur im Normblatt DIN 7701 „Kunstharz-Preßstoffe, warmgepreßt“ aufgeführt ist. Die Gründe hierfür sind bereits auf S. 178 aufgeführt worden.

Die vorgesehenen Prüfkörper für geschichtete<sup>2</sup> und nichtgeschichtete<sup>3</sup> unterscheiden sich hauptsächlich in der Breite. Für nichtgeschichtete Stoffe wurde mit Rücksicht auf Stoffe mit groben Harzträgern (z. B. Typ T 2 mit Gewebeschnitzeln als Harzträger) eine Breite von 25 mm gegenüber 10 mm bei geschichteten gewählt (Form und Abmessungen in Abb. 21).

Bei der Verwendung dieser Prüfkörper für den Zugversuch ist vor allem darauf zu achten, daß die Körper äußerlich fehlerfrei sind, z. B.

<sup>1</sup> Vgl. MEMMLER: Handbuch der Kautschukwissenschaft, S. 610. Leipzig: S. Hirzel 1930.

<sup>2</sup> Vgl. VDE 0318 für geschichtete Kunstharz-Preßstoffe.

<sup>3</sup> Vgl. DIN 7701 für nichtgeschichtete Kunstharz-Preßstoffe.



sich nicht verzogen haben, sowie planparallele Flächen und unverletzte Kanten besitzen. Eine Vorbehandlung der Prüfkörper ist im Normblatt bisher nicht vorgesehen.

Die Laststeigerung soll stoßfrei gleichmäßig bis zum Bruch erfolgen.

Eine Sonderausführung des Zugversuchs ist in VDE 0318 für *gewickelte Rundrohre* vorgesehen. Bei diesen wird die Zugfestigkeit aus dem Zerplatzdruck beim *Innendruckversuch* bestimmt. Dazu wird der zu prüfende Rohrabchnitt durch miteinander verschraubte und gut abdichtende Platten an den Enden verschlossen und mit einer geeigneten Flüssigkeit z. B. Wasser-Glyzerin gefüllt und dann von innen durch hydraulischen Druck zum Aufreißen gebracht. Zum Abdichten eignen sich z. B. passende Ledermanschetten. Der Versuch hat den Vorteil der sehr gleichmäßigen Spannungsverteilung und raschen und bequemen Ausführung.

Die Zugfestigkeit  $\sigma_{zB}$  wird aus dem höchsten Preßdruck  $p$  (in atü), dem Innendurchmesser  $d$  (in cm) und dem Außendurchmesser  $D$  (in cm) nach der Formel

$$\sigma_{zB} = p \frac{d}{D-d}$$

berechnet. Von der Anwendung der genaueren Bachschen Gleichung (vgl. Hütte, 25. Aufl., S. 589) kann abgesehen werden.

Die britischen und amerikanischen Vorschriften verwenden für den Zugversuch an Isolierpreßstoffen einen Probekörper<sup>1</sup>, der zwar hinsichtlich der Spannungsverteilung (vor allem in der Einspannung) wesentlich günstiger geformt ist als die deutschen Zugstäbe, dafür aber preßtechnisch den Mangel ungleichmäßiger Dicke hat, wodurch eine gleichmäßige Härtung bei der Herstellung nicht möglich ist. Außerdem sind Dehnungsmessungen kaum ausführbar.

Der Probekörper für die Zugfestigkeit ist ein gepreßter Zugstab nach Abb. 117. Um die Verwendung *einer* Preßform für alle Preßstoffe zu gestatten, sind folgende Abmaße gestattet:

- für Warmpreßstoffe  $\pm 5\%$
- für Kaltpreßstoffe  $\pm 10\%$ .

(Für nichtplastische anorganische Preßstoffe ist die Form nicht geeignet; Sondervorschrift in Vorbereitung).

Vor der Prüfung werden die Proben 48 h bei  $50^\circ\text{C}$  vorbehandelt und anschließend im Exsikkator auf Raumtemperatur abgekühlt. Geprüft werden 5 Proben bei Raumtemperatur unter Benutzung der Proben-

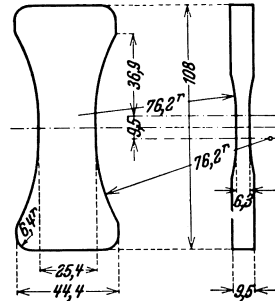


Abb. 117. Amerikanischer Zugstab für Isolierpreßstoffe. (A.S.T.M. D 48—33).

<sup>1</sup> A.S.T.M. D 48—33, 2/5.

halter nach Abb. 118<sup>1</sup>, die in einer Prüfmaschine mittels Gelenken so befestigt werden, daß Querspannungen vermieden werden.

Die Geschwindigkeit der oberen Einspannvorrichtung soll so sein, daß die Last genau abgelesen werden kann, und soll nicht höher als 1,27 mm/min sein.

Im Prüfungsergebnis sind anzugeben: Probenbreite und -dicke, gemessen in Probenmitte, Bruchlast, Zugfestigkeit beim Bruch, bezogen auf den kleinsten Querschnitt vor dem Versuch, Materialbeschreibung, Bruchaussehen und -lage, Belastungsgeschwindigkeit.

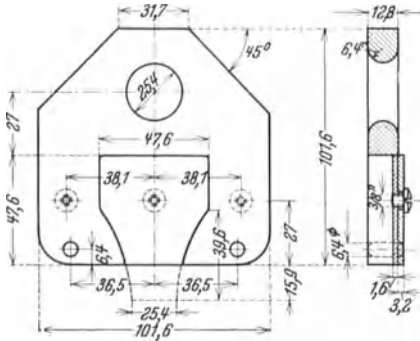


Abb. 118. Aufhängung für den amerikanischen Zugstab. (A.S.T.M. D 48—33.)

### c) Druckversuch.

#### α) Druckfestigkeit.

Der Druckversuch hat bisher in der Isolierstoffprüfung nur untergeordnete Bedeutung. Je mehr aber die festen Isolierstoffe neben ihrer Aufgabe zu isolieren auch Baustoff werden, wächst das Interesse für das Verhalten

der Isolierstoffe gegenüber Druckbeanspruchungen, zumal reine Druckbeanspruchungen in der Praxis nicht selten sind.

Beim Druckversuch wirken die äußeren Kräfte im entgegengesetzten Sinne auf den Probekörper wie beim Zugversuch. Um richtige Ergebnisse zu erhalten, muß die Kraft senkrecht auf die Endflächen der Probe drücken. Die Endflächen der Proben müssen möglichst eben sein und senkrecht zur Achse der Probe stehen. Die Druckübertragung erfolgt zweckmäßig durch gehärtete ebene Druckplatten, von denen eine als Kugellager auszubilden ist, damit etwaige Ungenauigkeiten in der parallelen Stellung der Endflächen sich ausgleichen können. Bei sachgemäßer Durchführung des Versuches nimmt man an, daß die Druckkraft  $P$  in der zylindrischen oder würfelförmigen Probe eine über den ganzen Querschnitt  $F_0$  gleichmäßig verteilte Druckspannung

$$\sigma_d = \frac{P}{F_0}$$

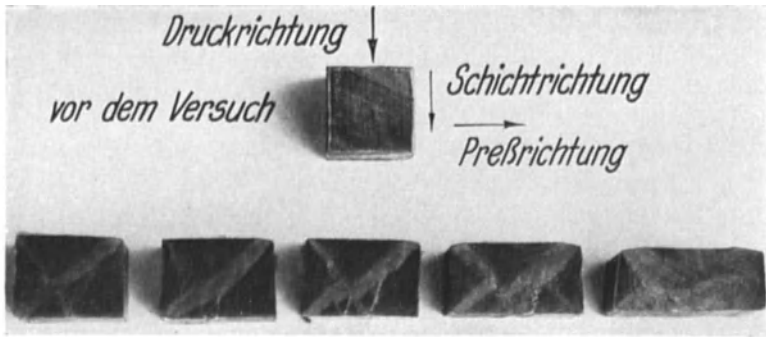
in kg/cm<sup>2</sup> erzeugt.

Unter dem Einfluß dieser Spannung erleidet die Probe Formänderungen, die sich in Höhenverminderung und Querschnittsvergrößerung äußern.

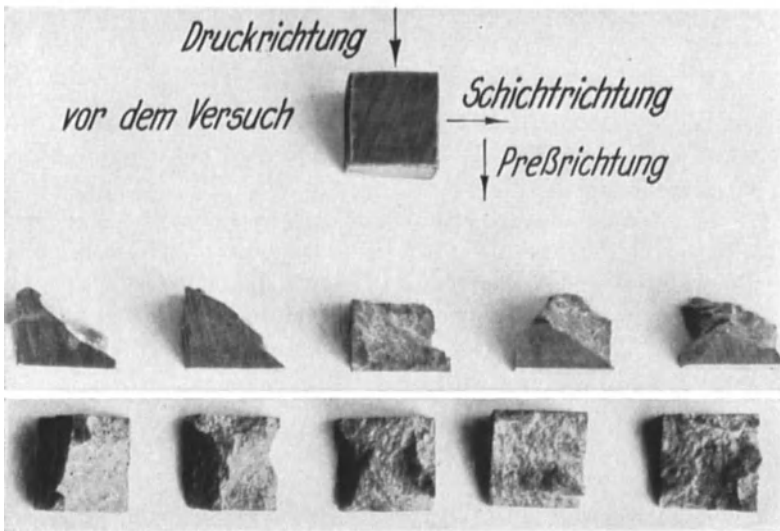
Der Verlauf des Druckversuches ist bei Isolierstoffen mit homogenem Gefüge ähnlich wie beim Zugversuch. Die Verformungen (Stauchungen)

<sup>1</sup> A.S.T.M. D 48—33, 2/5.

verlaufen zunächst proportional den Druckspannungen bis zur „Proportionalitätsgrenze“, wachsen dann allmählich stärker bis zur Quetsch- oder Fließgrenze. Diese Grenze, die der Streckgrenze beim Zugversuch entspricht, ist gekennzeichnet durch das Auftreten größerer bleibender



a



b

Abb. 119 a und b. Verhalten von geschichtetem Kunstharz-Preßstoff (Typ Z<sub>3</sub>) beim Druckversuch in Abhängigkeit von der Schichtrichtung: a plastische Verformung, b spröder Bruch.

Formänderungen. Zähre Isolierstoffe (z. B. einige Polymerisate) werden nach Überschreiten der Quetschgrenze immer stärker zusammengedrückt unter erheblicher Verformung (Ausbauchung) und zeigen höchstens Anrisse aber keinen Bruch. Spröde Isolierstoffe (z. B. keramische Stoffe) gehen vorher zu Bruch, wobei bei zylindrischen Proben über den Druckflächen Druckkegel, bei prismatischen Proben Pyramiden ausgebildet

werden. Bei einigen Kunstharz-Preßstoffen mit schichtartigem Aufbau, z. B. Typ Z3, treten je nach der Beanspruchungsrichtung beide Arten der Verformung auf (Abb. 119a und b). Liegt die Druckrichtung in Schichtrichtung, ist die Verformung wie bei einem zähen Stoff (Abb. 119a), liegt sie quer zur Schichtrichtung, führt die Verformung zu sprödem Bruch mit Ausbildung von Pyramiden-Bruchstücken (Abb. 119b). Bei Preßstoffen ist grundsätzlich bei der Prüfung auf die Preßrichtung zu achten, da die Festigkeiten in den verschiedenen Richtungen unterschiedlich sind.

Als Druckfestigkeit  $\sigma_{dB}$  wird die höchste Druckspannung bezeichnet, die der Körper beim Druckversuch aushält.

Zur Durchführung des Druckversuches zur Ermittlung der Druckfestigkeit  $\sigma_{dB}$  eignet sich unter anderem das in Abb. 108 gezeigte Universalprüfgerät.

Einige Beispiele aus den in- und ausländischen Vorschriften erhellen die Versuchsausführung, bei welcher vor allem auf Innehaltung der Versuchsgeschwindigkeit zu achten ist. Denn die Ergebnisse hängen — wie bei allen Festigkeitsversuchen — in starkem Maße von der Beanspruchungsgeschwindigkeit ab.

#### *Glimmer.*

Für diesen Isolierstoff ist in den französischen Vorschriften<sup>1</sup> eine Sonderanordnung des Druckversuches vorgesehen, die durch die Eigenart des Materials bedingt ist.

Danach werden zur Bestimmung der *Druckfestigkeit* (*résistance à l'écrasement*)  $25 \times 25 \text{ mm}^2$  große Glimmerproben zu einem Würfel von 25 mm Kantenlänge gestapelt; der Würfel wird bei einer Laststeigerung von 29 "myriapièzes"<sup>2</sup> in der Minute bis zur Zerstörung beansprucht.

#### *Keramische Isolierstoffe.*

Deutsche Vorschriften (VDE) sind in Vorbereitung; voraussichtlich wird ein 25 mm hoher Zylinder mit 25 mm Dmr. vorgeschrieben werden.

Die amerikanischen Vorschriften für diese Stoffe<sup>3</sup> sehen zur Bestimmung der *Druckfestigkeit* (compressive strength) einen Zylinder vor mit 28,6 mm Höhe und 28,6 mm Dmr. (Herstellung s. S. 54; die Zylinderendflächen sind schon vor dem Brand möglichst eben und planparallel zu gestalten und nach dem Brand planparallel zu schleifen.)

Mindestens 5 Proben werden bei Raumtemperatur geprüft, wobei zwischen Zylinderendflächen und den Druckplatten der Prüfmaschine

<sup>1</sup> U.S.E. 1937/38 53, S. 1070.

<sup>2</sup> 1 myriapièze (mapz) = 10000 pièzes, 1 kg/mm<sup>2</sup> = 0,98 mapz.

<sup>3</sup> A.S.T.M. D 116—34, 7/11.

etwa 0,4 mm dicke Löschpapierlagen als Polster gelegt werden, um Ungleichmäßigkeiten der Zylinderflächen auszugleichen. Im übrigen entsprechen Versuchsausführung und die geforderten Angaben im Prüfungsergebnis im wesentlichen den folgenden Vorschriften für Isolierpreßstoffe.

#### *Isolier-Preßstoffe.*

a) *Nichtgeschichtet.* Während die deutschen Normen DIN 7701 einen Würfel von 10 mm Kantenlänge, der aus Normalstäben herausgeschnitten werden kann, für die Prüfung auf Druckfestigkeit vorsehen, wird in den amerikanischen Vorschriften (A.S.T.M. D 48—33, 6/9) ein formgepreßter Zylinder (31,8 mm hoch, 28,6 mm Dmr.) vorgeschrieben.

Um die Verwendung *einer* Preßform für alle Preßstoffe zu gestatten, sind folgende Abmaße zulässig:

für Warmpreßstoffe  $\pm 5\%$ ,  
für Kaltpreßstoffe  $\pm 10\%$ .

Die Proben werden vor dem Versuch 48 h bei  $50 \pm 5^\circ \text{C}$  vorbehandelt und anschließend im Exsikkator auf Raumtemperatur abgekühlt.

Fünf Zylinder werden bei Raumtemperatur auf einer Prüfmaschine geprüft, die auf  $\pm 0,5\%$  genau anzeigt. Die Belastungsgeschwindigkeit soll so gewählt werden, daß die Geschwindigkeit der oberen Druckplatte der Maschine nicht mehr als 1,27 mm/min beträgt.

Im Prüfungsergebnis sind anzugeben: Probenabmessungen, Bruchlast jeder Probe, Druckfestigkeit  $\sigma_{dB}$  jeder Probe, Materialart, Verhalten während der Belastung, Belastungsgeschwindigkeit, Versuchsdauer.

b) *Geschichtet.* Für geschichtete Isolierpreßstoffe ist in deutschen VDE-Vorschriften (VDE 0318) die Probeform abhängig vom Erzeugnis. Aus Platten (10 mm dick und mehr) werden Würfel entnommen, deren Kantenlänge der Plattendicke entspricht. Aus Vollstäben oder Flachleisten werden Abschnitte entnommen, deren Länge den mittleren Querschnittsabmessungen entspricht. Aus Rohren werden Abschnitte entnommen, deren Länge dem mittleren Außenmaß entspricht.

Die Beanspruchung erfolgt stets in Richtung der Längsachse. Die Versuchsgeschwindigkeit ist nicht angegeben.

#### $\beta$ ) Formänderung.

Die Formänderung beim Druckversuch ist an Isolierstoffen meist nicht gemessen worden. Neuerdings hat die Messung aber erhöhte Bedeutung, seitdem in zunehmendem Maße nichthärtbare Kunststoffe verwendet werden, deren Erweichungspunkt oft unter  $100^\circ$  liegt. Bei Raumtemperatur zeigen diese Stoffe daher bei oft nur geringer

Druckbeanspruchung bleibende Formänderungen, die als „kalter Fluß“ bekannt sind, und deren Ausmaß sehr stark zeitabhängig ist. Während in Deutschland Prüfverfahren hierfür noch nicht festgelegt sind, hat man in den Vereinigten Staaten Verfahren ausgearbeitet. H. CHASE<sup>1</sup> empfiehlt einen einfachen Prüfapparat, an welchem gleichzeitig 5 Würfel von  $\frac{1}{2}$ '' Kantenlänge mit je einem Gewicht von 1000 Pfund (planer Druckstempel) belastet werden und mit Hilfe einer Meßuhr die Höhenänderung in Abhängigkeit von der Zeit (stündliche Ablesung) bei etwas erhöhter Temperatur von 40 bis 49° C gemessen wird. R. BURNS und

Tabelle 18.

Werkstoff	Kalter Fluß in %	Werkstoff	Kalter Fluß in %
Phenolharz-Preßstoffe	0,4	Polystyrol . . . . .	2,0—22
Harnstoffharz-Preßstoffe	0,4—7	Akrylate . . . . .	1,0—50
Hartgummi . . . . .	0,5—5	Phenolgießharz . . . . .	10,0
Zelluloseazetat . . . . .	2,0—64	Benzylzellulose . . . . .	76,0

HOPKINS<sup>2</sup> bestimmten mit dem gleichen Apparat den kalten Fluß als Höhenänderung in Prozenten nach 24stündiger Belastung bei 49° C (s. Tabelle 18).

Es erscheint jedoch nicht notwendig, zur Messung des „kalten Flusses“ neue Geräte zu entwickeln. Vielmehr dürfte der normale Druckversuch geeignet sein, ausreichenden Einblick in die federnden und bleibenden Formänderungen zu gewinnen, sofern die Versuche in Abhängigkeit von Zeit und Temperatur durchgeführt werden. Auch die Plattenplastometer (s. S. 39) sind zur Versuchsausführung in einigen Fällen geeignet, da sie im Grunde lediglich einfache Spezialgeräte für Druckversuche darstellen.

In der britischen Vorschrift für *Isolierpreßstoffe* ist der Druckversuch unter Berücksichtigung der Formänderung vorgeschrieben (BERA B/S. 1)<sup>3</sup>.

Als Probenform ist ein Zylinder (15 mm Dmr., 15 mm hoch in Form gepreßt oder geschnitten) vorgesehen. Falls Proben in diesen Abmessungen nicht hergestellt werden können, sind Zylinder von 10 mm Dmr. und 10 mm Höhe zu benutzen. Anfangsbelastung 100 kg/cm<sup>2</sup>. Die Zusammendrückung soll bei jeder Laststufe nach 1 und 10 s gemessen werden. Die Ablesung der Zusammendrückung ist an einer an der Prüfvorrichtung befestigten Meßlehre vorzunehmen bei einer Vergrößerung nicht unter dem 100fachen. Für die 15-mm-Probe ist die

<sup>1</sup> CHASE, H.: Amer. Plastics Bd. 8 (1932) S. 153.

<sup>2</sup> BURNS, R. u. HOPKINS: Mod. Plastics Bd. 14 (1937) S. 42.

<sup>3</sup> The British Electrical and Allied Industries Research Association, London SW 1.

Belastung festzustellen, bei der die Zusammendrückung 0,5 mm beträgt. Die Zusammendrückung  $k$  soll errechnet werden nach der Formel

$$k = y + \frac{0,25 y}{y_1};$$

$y$  und  $y_1$  sind die Zusammendrückungen in mm nach 1 und 10 s. Für kleinere Proben ist eine entsprechende Reduktion vorzunehmen.

### γ) Eindruckversuch (Kugeldruck-Härte).

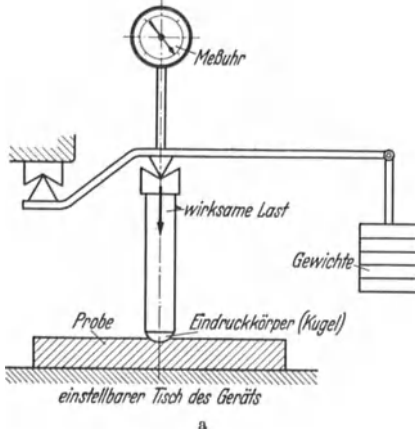
Die Prüfung auf Druckfestigkeit (s. S. 186) und die Messung der Formänderung bei Druckbeanspruchung (s. S. 189) gibt zwar einen ausreichenden Einblick in das Verhalten eines Stoffes bei reiner Druckbeanspruchung, hat aber den Nachteil der oft umständlichen und zeitraubenden Probenherstellung, zumal die Endflächen der Proben möglichst eben und planparallel sein müssen, und bedingt meist Prüfgeräte, welche Prüflasten von 2 t und mehr aufzubringen gestatten. Es ist daher verständlich, wenn statt dieser Prüfung die wesentlich einfacher auszuführende Eindruckprüfung Eingang in die deutschen Isolierstoff-Vorschriften gefunden hat, um so mehr als die Eindruckprüfung keine bestimmten Probenformen und -abmessungen voraussetzt, sondern weitgehend an beliebig gestalteten Formteilen ausgeführt werden kann.

Man mißt dabei den Widerstand, den ein Körper (das ist der zu prüfende Isolierstoff) dem Eindringen eines anderen entgegensetzt, d. h. im Sinne der Metallkunde die „Härte“ des Stoffes. Für die Konstruktion elektrischer Maschinen ist die mit der „Härte“ zusammenhängende Zusammendrückbarkeit für die richtige Dimensionierung tragender Isolationsteile unter Umständen sehr wichtig; z. B. sind auch im Transformatorbau die mittels der Härteprüfung erkennbaren Eigenschaften (u. a. bleibende und federnde Formänderung, Zeiteinfluß) von Bedeutung, da bei Unterlagscheiben die Härte beim Anziehen der Schrauben ausschlaggebend ist. Ferner eignet sich die Härteprüfung zur Beurteilung vieler äußeren Einflüsse, die auf die Oberfläche des Isolierstoffes wirken.

Gemäß den früheren deutschen Vorschriften wurde nach MARTENS-HEYN eine 5-mm-Kugel aus glashartem Stahl 0,1 mm tief in die Probe eingedrückt und als Härtemaßstab die zur Erzeugung dieser Eindrucktiefe 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 Eindrucktiefe erhält, je nachdem man die Kraft schnell oder langsam anwachsen läßt. Ein zuverlässiger Maßstab für die Nachwirkung läßt sich aus dieser Ausführungsform der Kugeldruck-Härteprüfung aber nicht gewinnen.

Die jetzigen deutschen Vorschriften greifen deshalb auf die ursprüngliche Ausführungsform der BRINELLSchen Kugeldruckprobe

zurück. Die Kugel ( $D=0,5$  cm Dmr.) wird mit einer konstanten Belastung  $P$  von 50 kg aufgedrückt. Gemessen wird die Eindringtiefe  $h$  nach 10 und 60 s *unter Last*. Aus der Eindringtiefe  $h$  wird der Härtegrad  $H$  berechnet



mittels der Formel:

$$H = \frac{P}{\pi D h}$$

oder, da  $\frac{P}{\pi D}$  bei gegebener Last  $P$  und gegebenem Kugeldurchmesser  $D$  konstant ist,

$$H = \frac{C}{h}.$$

Die Härtezahl  $H$  ist also ein Wert (in  $\text{kg/cm}^2$ ), der der Eindringtiefe  $h$  (in cm; Messung ist auf  $\frac{1}{100}$  mm genau auszuführen) reziprok ist.

Bei dieser Bestimmung der Härtezahl kann bequem etwaige Nachwirkung beobachtet werden. Man hat daher in den deutschen Vorschriften *zwei* Ablesungen nach 10 und 60 s Lasteinwirkung festgesetzt. Als Prüfgerät hat sich das in Abb. 120 a, b dargestellte Gerät bewährt. Bei Benutzung ist durch Blindversuche der Anteil der elastischen Durchbiegung des Gerätes unter Last an der gemessenen „Eindringtiefe“ zu ermitteln. Ferner ist darauf zu achten, daß die Probe — gewöhnlich ein Normalstab, dessen Härte in der Mitte der 15 mm breiten Fläche

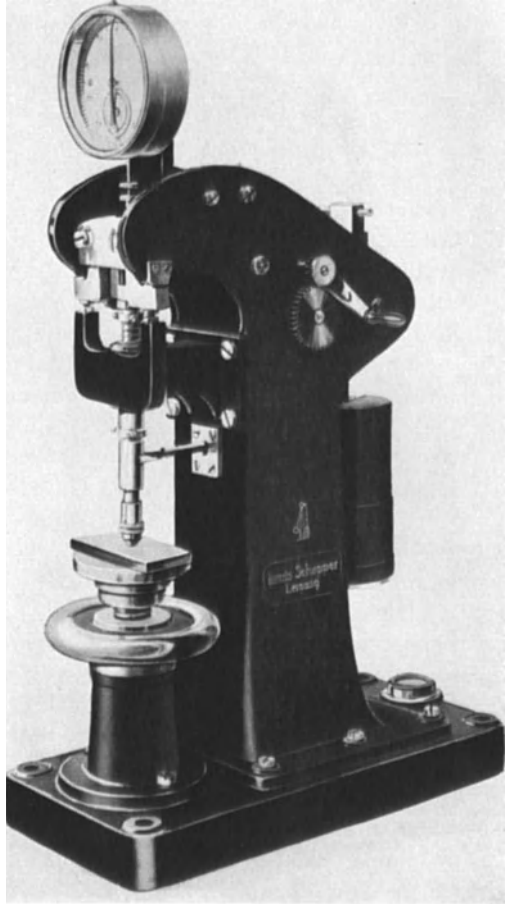


Abb. 120 a und b. Prüfgerät zur Bestimmung der Kugeldruckhärte nach VDE 0302.  
a Skizze; b Ausführungsform.



gemessen werden soll — unbelastet satt aufliegt. Ist dies nicht der Fall, so wird z. B. bei hohl aufliegenden Proben die unter Last auftretende Durchbiegung der Probe fälschlicherweise als „Eindrucktiefe“ mit gemessen.

Bei sehr harten Isolierstoffen, z. B. bei *keramischen Stoffen*, ist die Eindrucktiefe so gering, daß die Messung schwierig ist. Man benutzt bei diesen Stoffen daher immer noch die bekannte *Ritzhärte*-Prüfung, bei der die Beurteilung durch Ritzen mit Mineralien bekannter Ritzhärte nach MOHS vorgenommen wird (z. B. hat Quarz nach MOHS die Härte 7, Topas 8, Korund 9, Diamant 10).

Ausländische Isolierstoff-Vorschriften sahen bisher eine Härteprüfung nicht vor.

Die Prüfung auf Eindruckhärte hat erneut Anlaß gegeben, den Härtebegriff zu diskutieren<sup>1</sup>. In dem Maße, wie Isolierstoffe als Baustoffe verwendet werden, also andere Baustoffe, z. B. Gußeisen, verdrängen, werden die in der Metallprüfung bekannten Härtezahlen mit denen von Isolierstoffen verglichen. In der Metallprüfung pflegt man aber nicht wie bei der Prüfung nach VDE 0302 die *Gesamtverformung unter Last* zu ermitteln, sondern die *bleibende Verformung nach Entlastung*. Selbst wenn also in der Metallprüfung die dem VDE-Verfahren äußerlich ähnliche Prüfung nach BRINELL (Kugeleindruckprüfung) angewendet wird, sind diese nach BRINELL ermittelten Werte nicht vergleichbar mit denen nach VDE 0302 ermittelten.

Voraussichtlich muß der Härtebegriff und die Prüfung auf Härte neu gefaßt werden, um Werkstoffe der verschiedensten Art — vom Weichgummi bis zu harten keramischen Stoffen — miteinander vergleichen zu können. Da diese einheitliche Fassung noch nicht vorliegt, hat man z. B. für *Weichgummi* eine *Kugeldruckprüfung* in DIN DVM 3503 vorgeschrieben, die der Härtebestimmung nach VDE 0302 ähnelt, aber nur 1000 g Prüflast, 1050 g Gesamtbelastung (1000 g Prüflast + 50 g Vorlast mit Rücksicht auf die Weichheit des Materials) und eine 10-mm-Kugel vorsieht und außerdem nicht die Bezeichnung „Härte“ sondern „*Weichheit*“ verwendet. Dabei wird als „*Weichheitszahl*“ direkt die Eindrucktiefe der 10-mm-Kugel in die 6 mm dicke Probe betrachtet, wobei die Eindrucktiefe in  $\frac{1}{100}$  mm gemessen wird. Ist also die Eindrucktiefe zwischen 50 g Vorlast und 1050 g Gesamtlast  $x/100$  mm, so ist  $x$  die Weichheitszahl (als unbenannte Zahl).

Die Abweichungen dieses Verfahrens für weiche Isolierstoffe von dem VDE-Verfahren für harte Isolierstoffe, und die Tatsache, daß zwischen den weichen und harten Isolierstoffen alle Zwischenstufen zumindestens

<sup>1</sup> Vgl. u. a. W. KUNTZE: Richtlinien für einheitliche Härteprüfungen. Techn. Zbl. prakt. Metallbearb. Bd. 46 (1936) S. 659. — NITSCHKE, R.: Kunststoffe. Bd. 27 (1937) S. 166. — ERK, S. u. W. HOLZMÜLLER: Kunststoffe Bd. 28 (1938) S. 109; Bd. 29 (1939) S. 129.

möglich sind, verlangen eine einheitliche Handhabung des Härtebegriffs und der Härteprüfung<sup>1</sup>.

Die Härteprüfung wird einen Einblick in das plastische und elastische Verhalten der Isolierstoffe gestatten, wenn folgende Werte vorliegen: 1. Härtewerte, bezogen auf *Gesamtformänderung* (entsprechend VDE 0302 und DIN DVM 3503), 2. Beiwert zur Erfassung der *elastischen* und *plastischen* Formänderung (fehlt bisher), 3. Beiwert für den Zeiteinfluß (etwa entsprechend VDE 0302; aber auch nach Entlastung), wobei die endgültige Festlegung der Bezeichnungen für diese Werte noch offen ist.

Bei der späteren Festlegung eines einheitlichen Prüfverfahrens ist folgendes zu berücksichtigen:

Die *Eindrucktiefe* ist gegenüber der Messung der Eindruckfläche vorzuziehen, da viele Isolierstoffe, vor allem die nichthärtbaren Kunststoffe, keine sichere Messung der Eindruckfläche ermöglichen. Sie gestattet zudem bei der Abnahme eine für den Abnehmer offen sichtbare Anzeige.

Die Messung der *Gesamt-* und der *bleibenden Verformung* ist erforderlich.

Die *Prüflast* ist je nach dem Stoff verschieden zu wählen.

Als *Eindruckkörper* ist an Stelle der Kugel die Pyramide zu verwenden, da diese gegenüber der Kugel den Vorzug hat, daß die Eindrucktiefe innerhalb gewisser Grenzen der Last proportional verläuft. Die Pyramide ist dem Kegel vorzuziehen, weil die Kanten sich deutlicher abzeichnen und Risse an den Eindruckkanten deutlicher erkennen lassen. Der Spitzenwinkel soll 136° betragen. Als *Werkstoff* wird Stahl oder Hartmetall (z. B. Widia) für Kunststoffe geeignet sein.

Bei Festlegung der *Normalbelastungen* sollten die Laststufen der bisher am weitesten verbreiteten Prüfgeräte gewählt werden. Zur Tiefenmessung sollte auf kürzestem Wege die Bewegung der Eindruckkörperspitze zur Probenoberfläche ermittelt werden, da sonst infolge von möglichen zusätzlichen Formänderungen der belasteten Probe und des Prüfgerätes die wirklich gemessene Gesamteindrucktiefe verfälscht werden kann, vgl. das Prinzip der Vicatnadel (s. S. 242).

Zur Berücksichtigung des *Zeiteinflusses* ist die *Gesamtverformung* und die bleibende Verformung nach *mindestens je zwei Zeitabständen zu messen*.

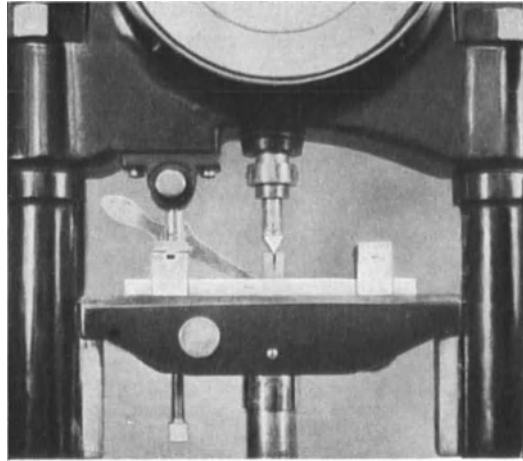
Eine nach diesen Gesichtspunkten ausgebaute „Härte“-Prüfung dürfte allen Forderungen und Wünschen entsprechen und die bisherigen Mängel der an und für sich einfachen Prüfung nach VDE 0302 vermeiden und auch weitgehend bei beliebig gestalteten Fertigerzeugnissen anwendbar sein.

#### δ) Spaltbarkeit.

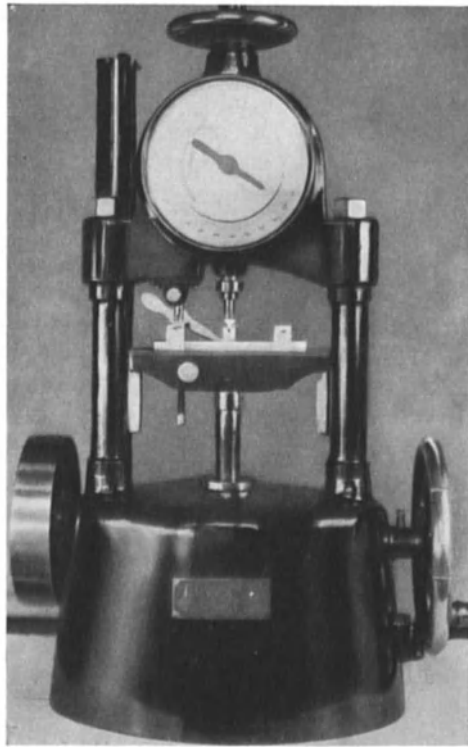
Eine Sonderprüfung für geschichtete Stoffe (Hartpapier, Hartgewebe) ist die Prüfung auf Spaltbarkeit, da der Widerstand gegen Spalten für die Beurteilung der Güte dieser Stoffe wesentlich ist. Die Prüfung ist hier

<sup>1</sup> Vgl. Fußnote 1, S. 193.

im Abschnitt „Druckversuch“ aufgeführt, da bei der in den deutschen Vorschriften VDE 0318 vorgesehenen Ausführung die Probe anfangs örtlich hauptsächlich auf Druck beansprucht wird. Als Probekörper werden Ausschnitte aus Platten verwendet ( $10 \times 15 \times 15 \text{ mm}^3$ ). Die Prüfung bedingt also mindestens 10 mm dicke Platten. Da die Ergebnisse von den Probenabmessungen abhängen, müssen Probekörper von Platten, die dicker als 10 mm sind, auf 10 mm abgearbeitet werden. Gemessen wird die Spaltbarkeit zwischen einer ebenen Platte, auf die die Probe mit der  $10 \times 15$ -mm-Fläche gesetzt wird, und einer Schneide von 18 mm Länge und einem Öffnungswinkel von  $60^\circ$  mit 0,5 mm Abrundungshalbmesser (vgl. Abb. 121). Die Schneide ist möglichst genau in der Mitte der Probe parallel zu den Schichten aufzusetzen, da das Ergebnis wesentlich anders ist, wenn diese Forderung nicht erfüllt ist. Versuche mit schlankeren Schneiden haben nicht befriedigt, da u. a. die Streuungen in den Ergebnissen größer werden.



a



b

Abb. 121a und b. Prüfung geschichteter Stoffe auf Spaltbarkeit nach VDE 0318. a Probenanordnung, b Prüfgerät mit Probe.

Die Schneide wird langsam in die Probe gedrückt, bis die Spaltung am Lastabfall erkennbar wird. Die gemessene Höchstlast wird in kg angegeben und als Widerstand gegen Spalten betrachtet. Als Prüfgerät eignet sich jeder Biege- oder Druckfestigkeitsprüfer mit einem Meßbereich bis 250 oder 500 kg. An Stelle der Druckfinne oder der oberen Druckplatte wird die oben beschriebene Schneide verwendet (vgl. Abb. 121a).

In ausländischen Vorschriften fehlt eine entsprechende Prüfung.

Bei der Prüfung von *Hartpapier* auf Spaltbarkeit ist zu berücksichtigen, daß die Festigkeit der *Harzschicht* in sich wesentlich größer ist als die der Papierschicht, d. h. der Zusammenhang der Papierfasern innerhalb einer Schicht. Die Spaltung wird daher fast stets in einer *Papier*-Schicht auftreten. Die Spaltflächen zeigen häufig beiderseits undurchtränkt erscheinende, also harzfreie Papierfasern. Auch bei den übrigen Schichtstoffen wie *Hartgewebe*, Typen T2 und Z3, ist der Spaltversuch bei geringem Aufwand sehr aufschlußreich.

#### d) Biegeversuch.

Von allen mechanischen Prüfungen an wenig formänderungsfähigen Isolierstoffen ist der Biegeversuch einer der am häufigsten ausgeführten Versuche. Er wird meistens nur zur Ermittlung der *Biegefestigkeit* (Biegespannung beim Bruch) ausgeführt, seltener zur Ermittlung des *Formänderungsvermögens* (Durchbiegung). Außerdem läßt sich der Biegeversuch zur Ermittlung des *Elastizitätsmoduls* (*E-Modul*) verwenden, sofern bei seiner Bestimmung gewisse Vorbedingungen bei der Versuchsausführung berücksichtigt werden (s. unten).

Bei harten Isolierstoffen hat der Biegeversuch gegenüber dem Zug- und Druckversuch den Vorteil der leichten und zuverlässigen Messung. Zudem ist zu berücksichtigen, daß die Biegebeanspruchung den praktischen Beanspruchungen weit häufiger entspricht als die reine Zug- oder Druckbeanspruchung. Ferner ist die aus dem Biegeversuch ermittelte Biegefestigkeit nur wenig abhängig von der Probengestalt.

Außerdem wird der Biegeversuch häufig angewendet, um grobe Einflüsse thermischer oder chemischer Beanspruchungen auf die „Festigkeit“ zu erkennen. Zweckmäßig werden dazu dünne Probekörper verwendet (vgl. S. 200, Dynstat-Gerät).

**Versuchsanordnungen.** Für die Ausführung des Biegeversuches kommen von den verschiedenen möglichen Anordnungen hauptsächlich drei in Betracht (vgl. Abb. 122 a, 123 a, 124 a). Überwiegend werden als Proben Stäbe prismatischer Form mit möglichst einfachem Querschnitt (z. B. Quadrat, Rechteck) verwendet. Am bekanntesten ist die in Abb. 122 a gezeigte Anordnung. Hier wirkt in der Mitte des auf zwei Auflagern im Abstand  $l$  aufliegenden Probestabes die Kraft  $P$ . Das dabei

auftretende Biegemoment  $M$  ist in der Ebene des Kraftangriffes am höchsten (Abb. 122b) und beträgt

$$M = P \cdot \frac{l}{4}.$$

Zur Berechnung der Biegespannung  $\sigma_b$  ist die Kenntnis des Widerstandsmomentes  $W$  nötig, da allgemein

$$\sigma_b = \frac{M}{W} = \frac{P}{4} \cdot \frac{l}{W}$$

ist. Das Widerstandsmoment  $W$  des meist benutzten rechteckigen Stabes ist

$$W = \frac{b \cdot h^2}{6},$$

wobei  $b$  die Breite,  $h$  die Höhe, d. h. Dicke des Stabes bedeuten<sup>1</sup>.

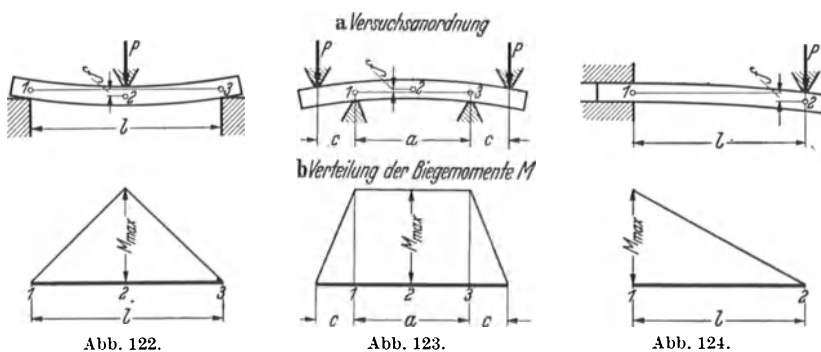


Abb. 122.

Abb. 123.

Abb. 124.

Abb. 122 bis 124. Ausführungsarten des Biegeversuches.

Oben: a Versuchsanordnung; unten: b Verteilung der Biegemomente.

Da  $\sigma_b$  in  $\text{kg/cm}^2$  angegeben wird, sind  $b$  und  $h$  in  $\text{cm}$ ,  $P$  in  $\text{kg}$  einzusetzen. Wenn z. B.  $l = 10 \text{ cm}$ ,  $h = 1 \text{ cm}$ ,  $b = 1,5 \text{ cm}$  ist, so ist  $\sigma_b$  zahlenmäßig das Zehnfache von  $P$ . Die beim Bruch vorliegende Spannung wird mit Biegefestigkeit  $\sigma_{bB}$  bezeichnet.

Zur Messung des *Formänderungsvermögens* (*Durchbiegung*) wird die Probe stufenweise oder mit stetiger Kraftsteigerung belastet, wobei jeweils der Einfluß der Zeit zu berücksichtigen ist. Die Durchbiegung bei zunehmender Belastung verläuft zunächst in der Regel proportional der Biegespannung, nimmt dann allmählich stärker zu, bis ähnlich der Streckgrenze beim Zugversuch die Biegegrenze erreicht ist, falls nicht — wie bei der Mehrzahl der harten Isolierstoffe — vorher schon die Bruchgrenze erreicht ist (Abb. 125). Bei weichen Isolierstoffen nehmen die Durchbiegungen nach Erreichen der Biegegrenze rasch zu, meist unter Lastabfall.

<sup>1</sup> Widerstandsmomente anderer Querschnittsformen s. u. a.: Hütte, Bd. 1, S. 603, 26. Aufl. Berlin: W. Ernst & Sohn 1931.

Die Durchbiegung  $f$  ist im Fall der Abb. 122a

$$f = \frac{P}{EJ} \cdot \frac{l^3}{48},$$

wobei  $E$  der Elastizitätsmodul in  $\text{kg/cm}^2$  und  $J$  das Trägheitsmoment bei rechteckigem Querschnitt ist:

$$J = \frac{b h^3}{12}.$$

Aus der Formel für  $f$  läßt sich der Elastizitätsmodul  $E$  berechnen:

$$E = \frac{P}{f} \cdot \frac{1}{J} \cdot \frac{l^3}{48}.$$

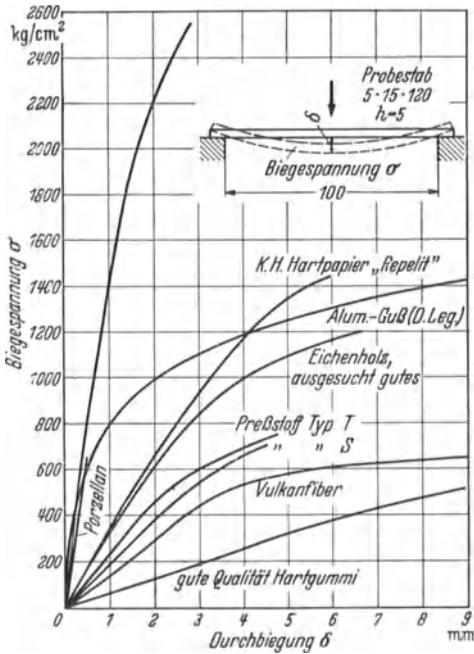


Abb. 125. Biegespannungen und Durchbiegungen einiger Isolierstoffe und Baustoffe (5 mm dicke Probefstäbe). (Aus Mehdorn, Kunstharzpreßstoffe. V.D.I.-Verlag, 1934.)

Um  $f$  zu messen, kann während des Versuches die Bewegung des Punktes 2 (Abb. 122a) gegen einen zwischen den Punkten 1 und 3 gespannten feinen Draht gemessen werden. Für genaue Messungen ist es notwendig, die Bewegungen  $a, b, c$  der Punkte 1, 2, 3 gegen einen festen Punkt möglichst genau zu ermitteln und aus der Differenz der Bewegungen die wirkliche Durchbiegung  $f$  zu errechnen:

$$f = b - \frac{a+c}{2}.$$

Die Bewegungen der Punkte 1 und 3 sind darauf zurückzuführen, daß 1. die Auflagenstellen der Probe sich verdrücken (insbesondere bei weichen

Isolierstoffen), 2. die Auflager infolge elastischer Formänderungen und toten Ganges der Biegemaschine bei Versuchsbeginn ihre Lage ändern. Aus diesem Grunde sind auch alle unmittelbaren Messungen der Durchbiegung aus der Verschiebung der Belastungsschneide gegenüber den Auflagern nicht genau.

Bei der Anordnung nach Abb. 123a ist

$$M = P \cdot c,$$

$$\sigma_b = \frac{M}{W} = \frac{P \cdot c}{W}.$$

Die Anordnung eignet sich vor allem zur Bestimmung des  $E$ -Moduls aus der Durchbiegung, da im Gegensatz zur Anordnung nach Abb. 122a

ein gleichmäßiges Biegemoment über einen größeren Stababschnitt erzeugt wird (Abb. 123b) und dadurch örtliche Ungleichmäßigkeiten des Werkstoffes nicht so stark in Erscheinung treten können wie bei der vorherigen Anordnung. Die *Durchbiegung*  $f$  (Verschiebung des Punktes 2 gegenüber der Linie 1 bis 3) ist

$$f = \frac{P}{EJ} \cdot \frac{ca^2}{8},$$

demnach der *Elastizitätsmodul*  $E$

$$E = \frac{P}{f} \cdot \frac{1}{J} \cdot \frac{ca^2}{8}.$$

Bei der Berechnung ist zu beachten, daß für  $P$  die *Einzel-Last* in kg, nicht die *Gesamtlast* ( $P + P = 2P$ ) einzusetzen ist (vgl. Abb. 123a).

Bei der Anordnung nach Abb. 124a ist

$$M = P \cdot l,$$

$$\sigma_b = \frac{M}{W} = \frac{P \cdot l}{W}.$$

Die Anordnung ist zur Bestimmung der Biegefestigkeit  $\sigma_{bB}$  höchstens bei Stoffen mit sehr hohem  $E$ -Modul geeignet, d. h. bei Stoffen, die bis zum Bruch nur sehr geringe Durchbiegungen aufweisen. Sonst kommt sie nur zur Bestimmung des  $E$ -Moduls bei kleinen Kräften in Betracht. Hierbei hat sie den Vorteil der einfachen Ausführung, aber auch den Nachteil, daß an der Stelle des höchsten Biegemoments (Abb. 124b) zugleich unkontrollierbare zusätzliche mechanische Spannungen — bedingt durch die Einspannung — auftreten.

Für die Berechnung des Elastizitätsmoduls  $E$  gilt:

$$f = \frac{P}{EJ} \cdot \frac{l^3}{3},$$

$$E = \frac{P}{f} \cdot \frac{1}{J} \cdot \frac{l^3}{3}.$$

**Prüfgeräte.** Zur Ausführung des Biegeversuches nach Abb. 122a eignet sich jeder Festigkeitsprüfer mit einer Zusatzeinrichtung für Biegeversuche (z. B. Universal-Prüfgerät nach Abb. 108).

Für häufig auszuführende Biegeversuche ist ein Spezialgerät vorzuziehen. Das Gerät nach Abb. 126 ist das in Deutschland am häufigsten angewandte Spezialgerät, bei dem die Durchbiegung — allerdings nur annähernd — unmittelbar abgelesen werden kann.

Bei allen Geräten, die für die Biegeversuche brauchbar sind, sind die Auflager möglichst um die Stabachse beweglich, um unvermeidliche schwache Ungleichmäßigkeiten der Prüfkörper auszugleichen, wodurch zusätzliche örtliche mechanische Spannungen, die das Ergebnis beeinträchtigen könnten, vermieden werden. Aus dem gleichen Grund sind die Auflagerkanten und die Druckfinne stets gerundet. Außerdem sind die Auflager meist in der Entfernung verstellbar, um neben der am

häufigsten vorkommenden Auflager-Entfernung (Stützweite) von  $l = 100$  mm auch andere Stützweiten wählen zu können.

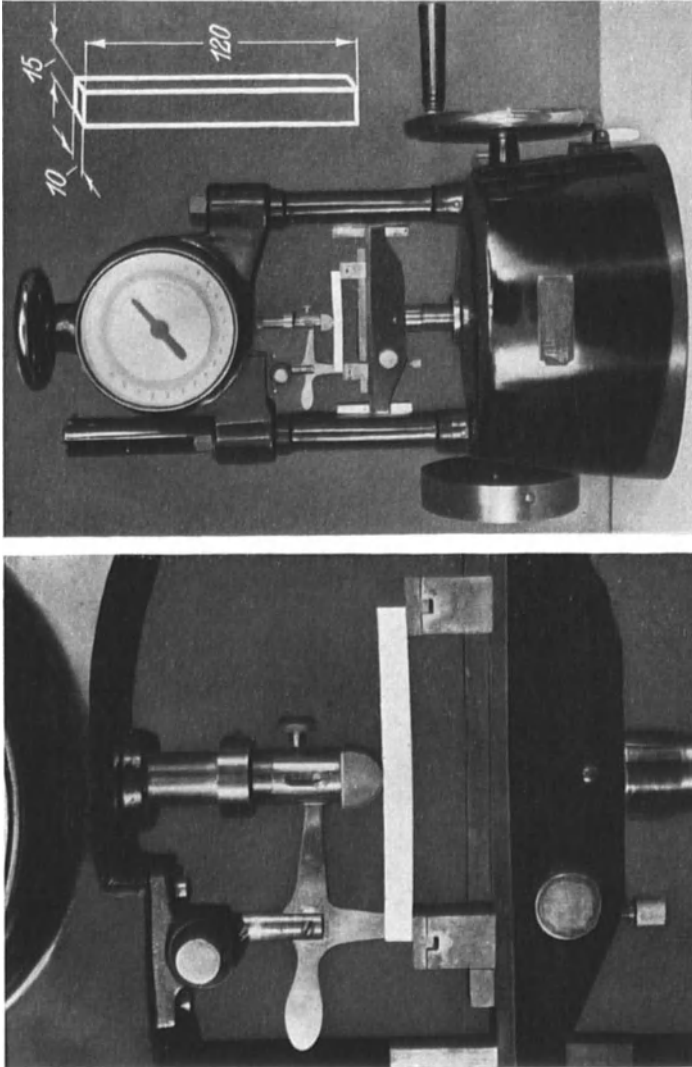


Abb. 126 a und b. Biegeversuch mit dem Biegefestigkeitsprüfer Bauart Schopper. a Probenanordnung, b Prüfgerät mit Probe.

Dynstat-Gerät nach SCHOB, NITSCHKE, SALEWSKI<sup>1</sup>. Die Bezeichnung des Gerätes soll kurz zum Ausdruck bringen, daß das Gerät sowohl für dynamische als auch für statische Probenbeanspruchung geeignet ist. Bei der statischen Beanspruchung (Biegeversuch) liegt die in Abb. 118 a

<sup>1</sup> Hersteller: L. Schopper, Leipzig.



gezeigte Anordnung im Prinzip vor. Das Gerät (Abb. 127A bis C) entstand aus zahlreichen Versuchen, die im Staatlichen Materialprüfungsamt Berlin-Dahlem mit dem Ziel durchgeführt wurden, unabhängig von Normalkörpern Werkstoffeigenschaften an beliebig gestalteten Fertigteilen ermitteln zu können.

Diese Notwendigkeit ergab sich aus der mit der „Typisierung nicht-keramischer gummfreier Isolierstoffe“ verbundenen amtlichen Über-

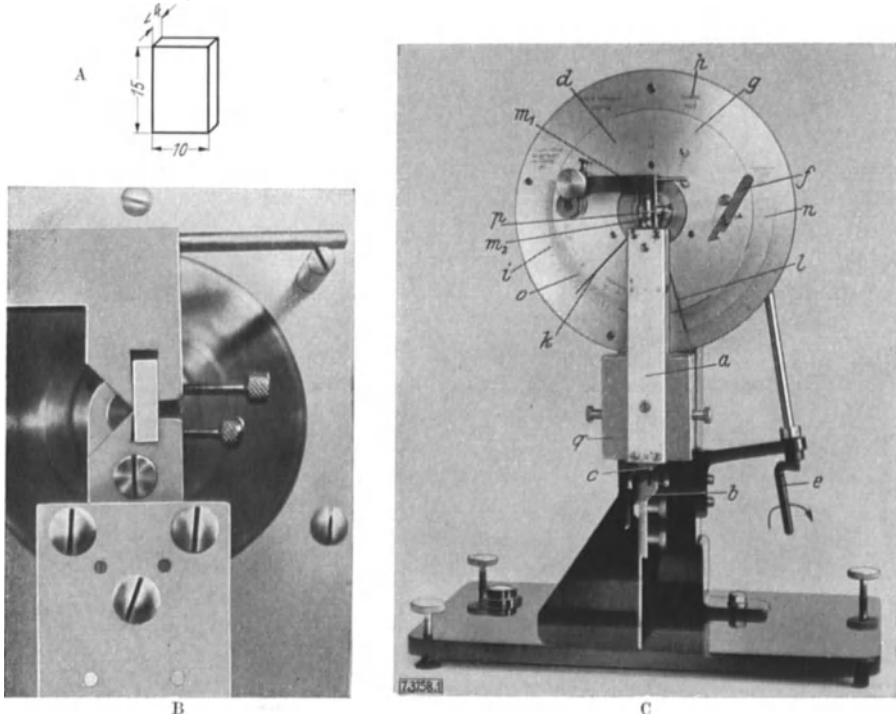



Abb. 127 A bis C. Dynstat-Gerät nach SCHOB, NITSCHKE, SALEWSKI, eingestellt für den Biegeversuch. A Probe; B Probenanordnung; C Prüfgerät mit Probe; *a* Pendel; *b* Einspannvorrichtung für Schlagversuch; *c* Schlagnase; *d* drehbare Scheibe; *e* Kurbel zur Einstellung von *d* mittels Kurbelwelle, Schnecke und Schneckenrad; *f* Klinke für Pendel *a* beim Schlagversuch; *g* Marken zur Einstellung der Fallwinkel  $60^\circ$  und  $90^\circ$ ; *h* fester Skalenring; *i* Skala zur Ablesung der von der Probe verbrauchten Schlagarbeit; *k* Schleppzeiger für Schlagversuch; *l* Schleppzeiger für Biegeversuch;  $m_1, m_2$  Einspannvorrichtung für Biegeversuch; *n* Skalen zur Ablesung des Biegemoments; *o* Skala zur Ablesung des Biegewinkels; *p* Probe beim Biegeversuch; *q* Zusatzgewicht für Pendel *a* beim Biegeversuch.

wachung, welche früher fast ausschließlich mittels des Normalstabes erfolgte. Da das Überwachungszeichen  (vgl. S. 288) als Zeichen bestimmter Mindeststoffeigenschaften in die Fertigtstücke eingepreßt wird, war es notwendig, auch am Fertigtstück die Stoffeigenschaften feststellen zu können.

Als Prüfkörper werden kleine, ebene oder auch schwach gekrümmte, höchstens  $10 \times 15 \text{ mm}^2$  große, bis 4 mm dicke Proben verwendet, die

somit unabhängig machen von der Einzelform der tausenderlei Fertigstücke. Die Werkstoffprüfung an diesen kleinen Proben aus beliebigen Fertigstücken ist zu unterscheiden von der als „Geräte-“ oder „Gebrauchs-“ Prüfung bezeichneten Beanspruchung, die sich eng an die Betriebsbeanspruchungen eines ganzen Gerätes oder Geräteteiles anlehnt.

Der wesentlichste Teil des Dynstat-Gerätes ist ein in seiner Masse durch Zusatzgewichte änderbares Pendel  $a$  (Abb. 127 C), das bei dynamischer Probenbeanspruchung (Schlagbiegeversuch) als frei fallendes Pendel zur Bestimmung der Arbeitsaufnahme der Probe (s. S. 220) verwendet wird und beim statischen Biegeversuch zur Ermittlung des von der Probe aufgenommenen Biegemomentes dient.

Das Gerät eignet sich vorzugsweise zur Feststellung der Schlagbiege- und Biegefestigkeit aller bis zu 4 mm dicken Formteile aus Kunst- und Preßstoffen, sowie aus keramischen Stoffen. Ferner können durch Messung des Biegewinkels beim Biegeversuch auch bleibende und elastische Formänderungen dieser Stoffe ermittelt werden. Voraussetzung dafür ist jedoch, daß die Härte des betreffenden Stoffes so groß ist, daß die durch die Einspannschrauben und Einspannkanten erzeugten Eindrücke verschwindend klein bleiben. Da die Proben aus Fertigstücken entnommen werden, ist die Streuung der Einzelwerte, besonders bei der Schlagbiegefestigkeit, erheblich größer als bei den sonst üblichen Stoffuntersuchungen. Denn maßgebenden Einfluß auf die Ergebnisse haben unter anderem bei Preßstoffen die Stelle der Probenentnahme (z. B. fallen bei einem Kasten die Ergebnisse verschieden aus, je nachdem, ob die Proben aus dem Boden, dem unteren, mittleren oder oberen Teil einer Kastenwand stammen), die Preßrichtung, die Länge des Fließweges; hinzu kommen Einflüsse der Gestaltung (Konstruktion). Alle diese Einflüsse bedingen bei ein und demselben Gegenstand starke Streuung der Einzelwerte. Andererseits ist es aber mit dem Dynstat-Gerät möglich, diese Einflüsse planmäßig zu untersuchen und damit wertvolle Aufschlüsse z. B. über die Schwankungen der Materialfestigkeit in einer Konstruktion zu erhalten.

Für die laufende Fertigung ist das Gerät recht brauchbar, da es bei geringem Probenverbrauch schnell ein Urteil über die Gleichmäßigkeit der Fertigung gibt und somit eine der wichtigsten Forderungen einer sinnvollen Werkstoffprüfung erfüllt. So ist das Gerät auch für die amtliche Überwachung typisierter Isolierpreßstoffe seitens des Staatlichen Materialprüfungsamtes Berlin-Dahlem eingeführt worden (vgl. S. 287). Bei planmäßigen Untersuchungen über das Verhalten von Stoffen bei dynamischer Beanspruchung leistet das Dynstat-Gerät gleichfalls gute Dienste. Es gestattet z. B. den Einfluß der freien Probenlänge, der Schlaggeschwindigkeit und -masse innerhalb gewisser Grenzen zu untersuchen.

*Sonstige Prüfgeräte.* Spezialprüfgeräte zur Ausführung von Biegeversuchen an Isolierstoffen in der Anordnung nach Abb. 123a sind serienmäßig bisher nicht gebaut worden.

Die Ausführung des Biegeversuches nach Abb. 124 a ist in Deutschland ungewöhnlich; vorgesehen zur Ermittlung der Biegefestigkeit ist diese Anordnung lediglich in englischen Vorschriften (s. S. 207). In Deutschland hat man trotz grundsätzlicher Bedenken (s. S. 199) die Anordnung nur zur Ermittlung des Elastizitätsmoduls bei Kunstharz-Preßstoffen (DIN 7701) gewählt. Spezialprüfgeräte hierfür sind in Deutschland nicht auf dem Markt; eine mit einfachen Mitteln zusammengebaute Einrichtung zeigt Abb. 128.

**Versuchsausführungen.** Die Ausführung von Biegeversuchen, insbesondere die Bestimmung der Biegefestigkeit  $\sigma_{bB}$ , hat nur Zweck bei wenig formänderungsfähigen Isolierstoffen, d. h. Stoffen mit verhältnismäßig geringer Durchbiegung beim Bruch. Bei Stoffen mit großer Formänderung sind die Abweichungen von den theoretischen Grundlagen (z. B. Änderung von  $l$  infolge der hohen Durchbiegung) so groß, daß bei diesen Stoffen besser der Zugversuch ausgeführt wird.

Zur Erzielung reproduzierbarer Werte sind vor allem Zeit- und Temperaturangaben bei der Prüfung einzuhalten.

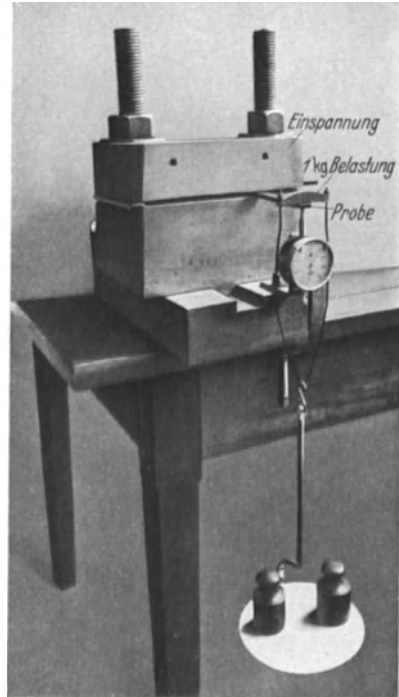


Abb. 128. Behelfsmäßige Einrichtung zur Bestimmung des  $E$ -Moduls aus dem Biegeversuch.

### Deutsche Vorschriften.

#### 1. Allgemeine Vorschriften für feste Isolierstoffe (VDE 0302).

Probekörper: „Normalstab“  $10 \times 15 \times 120 \text{ mm}^3$ .

Versuchsausführung bei Zimmerwärme nach Abb. 129. Die Kraft  $P$  greift in der Mitte zwischen den beiden Auflagern mit einer Druckfinne an, deren Abrundung  $r_1 = 10 \text{ mm}$  beträgt. Die Druckfinne ist so anzuordnen, daß sie sich freiwillig satt auf die Probe auflegt. Die Kanten der Auflagern sind bei  $r_2$  nach  $r = 1 \text{ mm}$  zu brechen. Stützweite  $100 \text{ mm}$ .

Für stoßfreie Belastung und einwandfreie Kraftmessung ist Sorge zu tragen. Ferner ist darauf zu achten, daß die Probe auf den Widerlagern satt aufliegt. Die Belastung ist mit gleichmäßiger Geschwindigkeit, und zwar um  $250 \text{ kg/cm}^2$  in  $1 \text{ min}$ , bis zum Bruch zu steigern.

Für die Feststellung der Gesamtdurchbiegung ist Ablesung am Millimetermaßstab hinreichend.

Die ersten Vorschriften sahen nach MARTENS Belastung in Stufen von je etwa  $150 \text{ kg/cm}^2$  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 auf Vorschlag von A. SCHOB dazu übergegangen, die Belastung gleitend bis zum Bruch zu steigern, wie es bei Festigkeitsuntersuchungen allgemein

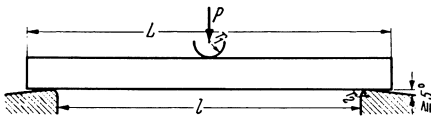


Abb. 129. Bestimmung der Biegefestigkeit nach VDE 0302, A 1. (Auflager nach DIN-Entwurf 53 452, Jan. 1940, geändert.)

üblich ist. Die Versuchsausführung ist dabei bequemer, weniger zeitraubend und ergibt die genaue Bruchlast. Um den Einfluß verschiedener Belastungsgeschwindigkeit auszuschalten, ist eine bestimmte Geschwindigkeit ( $250 \text{ kg/cm}^2$  in 1 min) festgesetzt worden, so daß ein Versuch mit einem Stoff mittlerer Festigkeit etwa 2 bis 3 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 der Kugeldruckhärte, bei der die Eindringtiefe nach zwei verschiedenen Belastungszeiten bestimmt wird (vgl. S. 192).

### 2. Sondervorschrift für Natur-Gesteine (VDE 0330).

Diese Vorschrift unterscheidet sich von der allgemeinen Vorschrift für feste Isolierstoffe nur in der Breite des Probestabes. Mit Rücksicht auf die häufig beträchtliche Inhomogenität der Natur-Gesteine sind an Stelle von 15 mm breiten Probestäben 50 mm breite vorgesehen.

### 3. Sondervorschrift für keramische Isolierstoffe<sup>1</sup>.

Der Verband Deutscher Elektrotechnischer Porzellanfabriken (VDEP) sieht für die Prüfung keramischer Stoffe einen zylindrischen Prüfstab vor (120 mm lang, 10 mm Dmr.). Wird der Stab im Preßverfahren hergestellt, ist ein ovaler Querschnitt zugelassen, wobei der große Durchmesser 10 mm, der kleine 8 mm betragen soll.

Zur Prüfung wird der Stab auf zwei Stahlrollen (10 mm Dmr.) mit 100 mm Abstand gelegt und in der Mitte mittels Stahlschneide durch Wasser- oder Bleischrotzulauf allmählich bis zum Bruch belastet.

<sup>1</sup> VDE-Vorschrift in Bearbeitung.

Die zylindrische Form der Prüfkörper ist mit Rücksicht auf die Sprödigkeit (sehr geringe Formänderung) der keramischen Stoffe gewählt; zusätzliche, unerwünschte Spannungen, wie sie bei diesen Stoffen bei prismatischen Stäben beim Versuch schwer vermeidbar sind, treten bei zylindrischen Stäben kaum auf.

4. *Sondervorschrift für Hartgummi* (VDE 0322)

(sinngemäß auch für Hartgummi aus Kunstkautschuk, zweckmäßig auch für nichthärtbare, formfeste Kunststoffe).

Da das Gefüge von Hartgummi verhältnismäßig gleichmäßig ist, konnte an Stelle des Normalstabes ein Kleinstab als Prüfkörper vorgeschrieben werden mit den Abmessungen  $5 \times 5 \times 60$  (mm), der im übrigen nach VDE 0302, jedoch bei einer Auflagerentfernung von 40 mm, geprüft wird.

Für nichthärtbare Kunststoffe wird voraussichtlich ein dem Normalstab ähnlicher Norm-Kleinstab ( $4 \times 6 \times 50$  mm<sup>3</sup>) eingeführt werden.

5. *Sondervorschrift für gewickelte Hartpapier- und Hartgeweberohre* (VDE 0318).

Um auch Rohre, aus denen Normalstäbe nicht entnommen werden können, auf Biegefestigkeit prüfen zu können, sind einige Hilfsmaßnahmen notwendig. Die Länge  $L$  der Versuchsstücke beträgt mindestens das 10fache, die Auflagerentfernung  $l$  mindestens das 8fache des Außendurchmessers  $D$ . Die Messungen führen nur dann zu einwandfreien Ergebnissen, wenn

$$s > \frac{D}{10},$$

wo  $s$  Wanddicke,  $D$  Außendurchmesser bedeuten.

Um ein Eindringen der Versuchsrohre zu vermeiden, werden die Stellen, an denen die Kräfte angreifen, vor dem Biegeversuch entsprechend Abb. 130 durch stramm passende, an den Stirnseiten sehr stark gerundete starre Körper ausgefüllt. Die Länge des mittleren Füllkörpers ist gleich dem Außendurchmesser  $D$ , jedoch nicht kleiner als 10 mm und nicht größer als 40 mm.

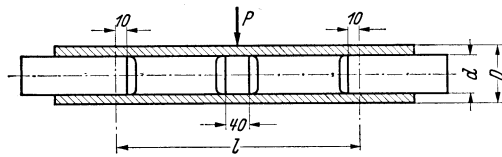


Abb. 130. Bestimmung der Biegefestigkeit an Rohren nach VDE 0318.

6. *Biegeversuch am Dynstat-Gerät.*

(Bisher noch nicht Vorschrift.)

a) *Proben und Probenherstellung für die Werkstoffprüfung* s. S. 50, 51.

b) *Proben und Probenherstellung für die Fertigstückprüfung.* Wie bei a) werden möglichst  $10 \times 15$  mm<sup>2</sup> große Abschnitte aus den Fertigstücken herausgearbeitet. Dabei ist darauf zu achten, daß Temperatur-

erhöhungen und mechanische Vorbeanspruchungen möglichst vermieden werden. Proben mit einem Krümmungshalbmesser von  $< 20$  mm sind gleichfalls zu vermeiden. Die Oberfläche der Proben muß mindestens auf der beim Versuch gezogenen Seite unverletzt bleiben. Die Kanten der Proben sind sorgfältig zu glätten. Der Ort der Probenentnahme ist stets — möglichst durch Skizze — anzugeben. Die Ergebnisse sind vom Ort der Probenentnahme stark abhängig. Man beschränkt sich daher im allgemeinen darauf, festzustellen, ob die für Isolierstoffe vorgeschriebenen Mindestwerte auch an ungünstigen Stellen des Fertigstückes erreicht werden (vgl. auch S. 202).

c) *Versuchsausführung.* Zur Ausführung des Biegeversuches wird zunächst das Pendel  $a$  (Abb. 127 C) in der Nulllage mittels einer Vorrichtung arretiert und je nach der Festigkeit des zu prüfenden Stoffes ohne oder mit einem kleinen oder großen Zusatzgewicht verwendet (entsprechend einem größten Biegemoment von 5, 9,8 oder 40 cmkg). Die drehbare Scheibe  $d$  wird mittels der Kurbel  $e$  so eingestellt, daß die Nullpunkte der Skalen  $n$  und  $o$  übereinander liegen (Einstellung in Abb. 127 C). Der Schleppzeiger  $l$  wird auf den Nullpunkt der Skala  $n$  gestellt. Auf der Scheibe  $d$  wird die Einspannvorrichtung  $m_1$  mittels Bolzen so befestigt, daß sich die linken Einspannkanten von  $m_1$  und  $m_2$  in der Pendelachse beinahe berühren (Abb. 127 B). In die Einspannung  $m_2$  wird die Probe  $p$  senkrecht eingesetzt. Die Schrauben an den Einspannungen werden nur soweit angezogen, daß sie die Probe gerade berühren; jede Vorbelastung der Probe durch zu weitgehendes Anziehen der Schrauben ist zu vermeiden. Nach Auslösung der Pendelarretierung wird mittels Kurbel  $e$  die Scheibe  $d$  mitsamt der Einspannung  $m_1$  entgegengesetzt der Uhrzeigerdrehung langsam und gleichmäßig gedreht. Die Drehbewegung wird durch die Probe  $p$  über die Einspannung  $m_2$  auf das Pendel  $a$  übertragen, das dadurch nach rechts gehoben wird. Dabei wird auf die Probe ein stetig wachsendes Biegemoment ausgeübt. Die Beanspruchung der Probe entspricht der Beanspruchung des Normalstabes beim üblichen Biegeversuch: die Endflächen der Schrauben entsprechen den beiden Auflagern beim Normalstabversuch, die in der Mitte zwischen den Schrauben dicht zusammenliegenden Einspannkanten der Einspannungen  $m_1$ ,  $m_2$  der Druckfinne. Das nach Bruch der Probe zurückfallende Pendel  $a$  wird von einem Gummipuffer aufgefangen.

Der Schleppzeiger  $l$  bleibt beim Bruch der Probe stehen und zeigt das Biegemoment beim Bruch in cmkg an. Sofern auch der Biegewinkel gemessen werden soll, ist im Augenblick des Bruches mit dem Drehen der Kurbel  $e$  aufzuhören, da sonst ein zu großer Bruchbiegewinkel gemessen wird.

Da die Beanspruchung der Probe der bei der bisher üblichen Prüfung am Normalstab auftretenden Beanspruchung entspricht (neutrale Faser

in Probenmitte), gilt für die Berechnung der Biegefestigkeit

$$\sigma_{bB} = \frac{M}{W} = \frac{6M}{b \cdot h^2},$$

wobei  $M$  das in cmkg gemessene Biegemoment,  $b$  die Breite,  $h$  die Dicke der Probe in cm sind.

Britische Vorschriften.

Allgemeine Vorschriften für feste Isolierstoffe (BERA B/S. 1, 1922).

Probekörper. Stab,  $15 \times 15 \times 200 \text{ mm}^3$ , mit Einschnitt an einem Ende (Abb. 131a).

Nichtgeschichtete Preßstoffe werden in Stabform gepreßt, geschichtete aus Platte geschnitten. Falls Stäbe der vorgesehenen Abmessungen nicht

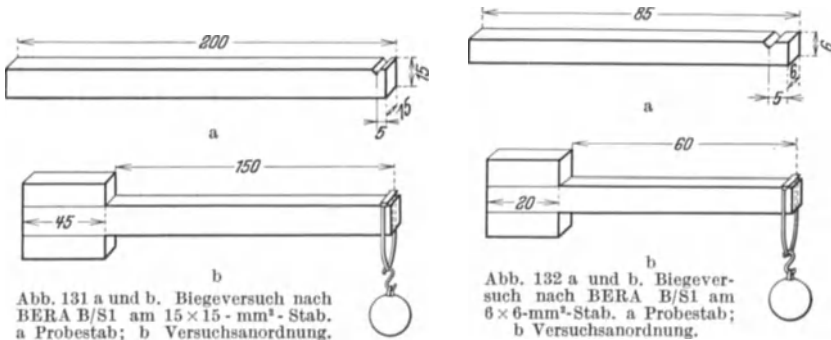


Abb. 131 a und b. Biegeversuch nach BERA B/S1 am  $15 \times 15 \text{ - mm}^3$ - Stab. a Probestab; b Versuchsanordnung.

Abb. 132 a und b. Biegeversuch nach BERA B/S1 am  $6 \times 6 \text{ - mm}^3$ - Stab. a Probestab; b Versuchsanordnung.

herstellbar sind, werden Kleinstäbe,  $6 \times 6 \times 85 \text{ mm}^3$  (Abb. 132a), verwendet.

Ausführung. Nach Abb. 131 b (bzw. 132b); die Last wird um etwa 9 kg/min gesteigert. Berechnung s. S. 199.

Die Versuchsausführung eignet sich nur für Isolierstoffe mit sehr geringer Formänderung. Selbst bei diesen Stoffen sind durch die Einspannung unkontrollierbare zusätzliche Spannungen zu erwarten, und zwar gerade an der Stelle des höchsten Biegemomentes.

Amerikanische Vorschriften.

Biegefestigkeit (flexural strength; transverse strength.)

1. Keramische Isolierstoffe (A.S.T.M. D 116—34).

Probekörper. Rundstab, 152 mm lang, 28,6 mm Dmr. (Herstellung s. S. 54).

Ausführung. Versuchsanordnung ähnlich wie nach VDE 0302; Auflager jedoch keilförmig, Auflagerabstand 127 mm, Druckfinne keilförmig ( $45^\circ$ ), Abrundung der Auflager und Finne  $r = 3,18 \text{ mm}$ . Zu prüfen sind bei rd.  $20^\circ \text{ C}$  mindestens 5 Proben, deren Durchmesser in Probenmitte

auf 0,025 mm genau zu messen ist (Mittel aus 2 Messungen in zwei senkrecht zueinander verlaufenden Richtungen). Zur Berechnung der Biegefestigkeit  $\sigma_{bB}$  dient die Formel

$$\sigma_{bB} = \frac{8P \cdot l}{\pi d^3}$$

( $P$  Bruchlast,  $l$  Auflagerabstand,  $d$  Probendurchmesser).

Im Prüfungsergebnis sind anzugeben:

Bruchlast, Durchmesser, Länge und Biegefestigkeit jeder Probe, Mittel der Bruchlasten und die Abweichungen vom Mittel in Prozenten, Beschreibung des Bruchaussehens und Verhalten des Materials unter Last, Belastungsgeschwindigkeit, Prüfmaschine, Kurvenblatt für  $\sigma_{bB}$ , welches die Einzelwerte — geordnet nach steigender Größe — enthält.

### 2. Isolierpreßstoffe (A.S.T.M. D 48—33).

Probekörper. Gepreßter Stab,  $12,7 \times 12,7 \times 127$  mm<sup>3</sup>.

Ausführung. Die Proben werden vor dem Versuch 48 h bei  $50 \pm 5^\circ$  C vorbehandelt und anschließend auf Raumtemperatur im Exsikkator abgekühlt. Fünf Stäbe werden bei Raumtemperatur geprüft. Versuchsanordnung ähnlich wie nach VDE 0302, jedoch mit 102 mm Auflagerabstand. Abrundung der Druckfinne und der Auflagerkanten  $r = 1,18$  mm. Die Belastungsgeschwindigkeit soll so groß gewählt werden, daß die Last genau gemessen werden kann, und daß die Durchbiegeschwindigkeit nicht über 1,27 mm/min steigt.

#### Französische Vorschriften.

Biegefestigkeit (résistance à la rupture par flexion).

#### Isolierpreßstoffe (U.S.E.: 1937/38—46 II).

Probekörper. Stab,  $15 \times 15 \times 200$  mm<sup>3</sup>.

Ausführung. Fünf Stäbe werden frühestens 24 h nach dem Pressen geprüft bei einem Auflagerabstand von 150 mm; Winkel der Belastungsschneide  $45^\circ$ ; Abrundungen  $r = 5$  mm. Belastungsgeschwindigkeit 5 kg/s bis zum Bruch. Angegeben wird der Größt- und Kleinstwert der Biegefestigkeit und der Mittelwert der drei übrigen Ergebnisse.

### e) Verdrehversuch.

Der Versuch hatte bisher nur gelegentlich Interesse für die Prüfung keramischer Isolierstoffe. Man beschränkte sich dabei meist auf Ermittlung der *Verdrehfestigkeit*, die bei Anwendung keramischer Stoffe z. B. als Hängeisolatoren praktische Bedeutung haben kann.

Beim Verdrehversuch werden die Enden eines Drehkörpers gegeneinander bis zum Bruch verdreht. Als Prüfkörper eignet sich z. B. ein Prüfkörper nach Abb. 111, der gleichzeitig als Zugstab für den Zug-



versuch dient. Zur Ausführung des Verdrehversuches werden die Einspannenden angeschliffen, um einen festen Sitz in den Einspannungen der Prüfmaschine zu sichern. Die beiden Einspannungen sind in der Probeachse drehbar gelagert. Die eine Einspannung hat mechanischen Antrieb zur Verdrehung der Probe, die andere trägt einen Hebel  $r$ , der bei Verdrehung der Probe auf eine Waage oder andere Meßvorrichtung einen Druck  $P$  ausübt. Das auf die Probe ausgeübte Drehmoment ist dann

$$M_d = P \cdot r.$$

Da das mit der Meßvorrichtung verbundene Probenende durch den Gegendruck der Waage an der Drehung gehindert ist, entsteht in der Probe eine Verdrehspannung

$$\sigma_t = \frac{M_d}{W_d},$$

wobei  $W_d$  das Widerstandsmoment der Probe auf Verdrehung ist. Bei kreisförmigem Querschnitt wie bei der Probe nach Abb. 111 ist

$$W_d = \frac{\pi}{16} d^3 \quad (d = \text{Durchmesser}).$$

Ermittelt wird die Verdrehfestigkeit, das ist die Verdrehspannung beim Bruch  $\sigma_{tB}$ .

**f) Schlagbiegeversuch.**

Der Schlagbiegeversuch soll zur Beurteilung der Sprödigkeit von Isolierstoffen dienen, d. h. ihres Verhaltens gegenüber stoßweise auftretender Beanspruchung. Zu diesem Zweck wird ein stabförmiger Körper — gekerbt oder ungekerbt einseitig eingespannt oder doppelseitig gelagert — mittels eines Schlagwerkes zerschlagen, das die von dem Körper verbrauchte Schlagarbeit zu messen gestattet. Diese Schlagarbeit, bezogen auf den Querschnitt oder auf eine Widerstandsmomentgröße, sollte der Maßstab für die Sprödigkeit des Stoffes sein. Man hatte früher dabei nicht berücksichtigt, daß die Schlagarbeit — ebenso wie die Sprödigkeit — kein Festwert ist, sondern sehr stark von den Versuchsbedingungen abhängt, so daß ein und derselbe Stoff sowohl spröde als auch zähe erscheinen kann (z. B. Pech). Zu den ausschlaggebenden Versuchsbedingungen gehören unter anderem Schlaggeschwindigkeit und Probengestalt und -abmessungen. Diese Faktoren beeinflussen das Versuchsergebnis

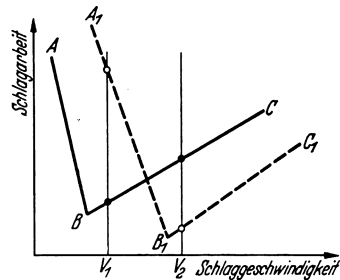


Abb. 133. Bewertung zweier Werkstoffe bei zwei Schlaggeschwindigkeiten  $V_1$  und  $V_2$ . Die Kurvenzüge der beiden Werkstoffe  $ABC$  und  $A_1, B_1, C_1$  sind gegeneinander verschoben, so daß eine Prüfung bei den Schlaggeschwindigkeiten  $V_1$  und  $V_2$  eine umgekehrte Bewertung ergibt.

sehr stark und können gegebenenfalls eine umgekehrte Bewertung bewirken (Abb. 133)<sup>1</sup>.

Es ist also nicht möglich, mittels *eines* beim Schlagversuch ermittelten Wertes eine Aussage über die Sprödigkeit des Stoffes und allgemein über sein Verhalten in der Praxis bei Stoßbeanspruchung zu machen. *Ein*

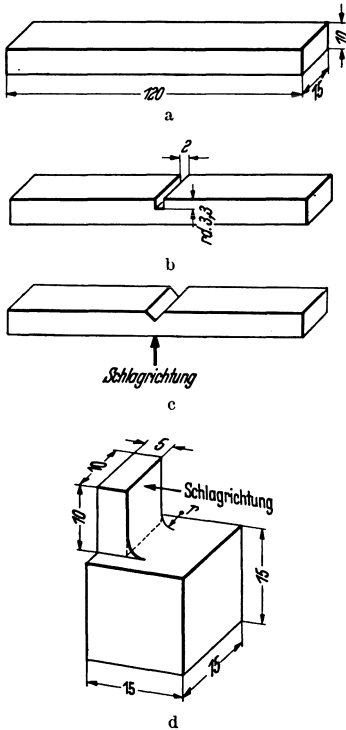


Abb. 134 a bis d. Prüfkörper für Schlagbiegeversuche an Isolier-Preßstoffen. a Normalstab, ungekerbt; b Normalstab mit L-Kerb; c Normalstab mit V-Kerb; d Zapfenkörper nach ZEBROWSKI.

unter bestimmten Versuchsbedingungen ermittelter Wert eignet sich nur zur Beurteilung der Gleichmäßigkeit von Isolierstofflieferungen, also im Rahmen von Abnahmeprüfungen. Will man das Verhalten des Stoffes bei praktischer Beanspruchung vorhersagen, dann müssen *mindestens zwei* Werte unter verschiedenen Versuchsbedingungen ermittelt werden. Am aufschlußreichsten hat sich der Versuch an zwei verschiedenen Probekörpern erwiesen, und zwar wird im Reich hauptsächlich der Normalstab,  $120 \times 15 \times 10 \text{ mm}^3$ , ungekerbt und gekerbt verwendet auf Grund der Untersuchungen von R. NITSCHKE und W. ZEBROWSKI<sup>2</sup> (Abb. 134 a und b, ferner Abb. 134 c und d). Für die Praxis wichtig und notwendig sind zusätzliche Schlagprüfungen (vgl. S. 59) am Fertigerzeugnis, deren Ausführung von der Art des Erzeugnisses abhängt, also von Fall zu Fall verschieden ist.

Die beim Schlagbiegeversuch am ungekerbten Stab ermittelte Schlagarbeit, bezogen auf den Stabquerschnitt in  $\text{cm}^2$ , wird als

*Schlagbiegefestigkeit*  $a_n$

bezeichnet, die am gekerbten Stab ermittelte Schlagarbeit, gleichfalls auf den Querschnitt bezogen, als

*Kerbzähigkeit*  $a_k$

und das Verhältnis

$$\text{KZ} = \frac{a_n}{a_k}$$

als Kerbeinflußzahl. Diese Zahl ist — innerhalb gewisser Grenzen — charakteristisch für die Sprödigkeit der Stoffe. Bei kerbunempfindlichen

<sup>1</sup> KUNTZE, W. u. R. NITSCHKE: Kunststoffe Bd. 29 (1939) S. 33—41.

<sup>2</sup> NITSCHKE, R. u. W. ZEBROWSKI: Plast. Massen Bd. 8 (1938) S. 33 u. 65.

Stoffen ist  $KZ = 1$ , bei kerbempfindlichen Stoffen dagegen ist  $KZ$  bis zu 100.

Die *Herstellung von Prüfkörpern*, die für Schlagbiegeversuche geeignet sind, ist recht schwierig. Notwendig ist, daß die Herstellungsbedingungen genau festgelegt und innegehalten werden — eine Forderung, die heute noch nicht ausreichend erfüllt ist. Daher charakterisieren vielfach die Werte aus dem Schlagversuch weniger den geprüften Stoff, sondern mehr die Herstellungsbedingungen. Denn es ist z. B. bei Kunstharz-Preßstoffen ohne weiteres möglich, bei Verwendung derselben Preßmasse je nach den Preßbedingungen Schlagwerte zu erhalten, die im Verhältnis 1 : 2 stehen, ohne daß die Prüfkörper äußerlich solche Unterschiede erkennen ließen.

Die Abmessungen der Prüfkörper müssen gleichfalls genau festgelegt sein und innegehalten werden, um übereinstimmende Ergebnisse zu erhalten. Dabei ist zu berücksichtigen, daß die Schlagwerte je nach Art des Isolierstoffes verschieden stark von der Probendicke abhängig sind. Daher wäre es notwendig, *die Dicke* zu wählen, die dem Isolierstoff und den Wanddicken bei der praktischen Anwendung entspricht. Im Reich ist dieser Forderung bereits insoweit entsprochen, als neben dem 10 mm dicken Normalstab auch Schlagversuche am Dynstat-Gerät (vgl. S. 220) mit verschiedenen dicken Proben (1 bis 4 mm) vorgesehen sind.

Man hat sich bemüht, den Einfluß der Dicke dadurch auszuschalten, daß man die gemessenen Schlagwerte unter Berücksichtigung der Dicke umrechnete. So ist es in Deutschland auch heute noch üblich, die gemessene von der Probe verbrauchte Schlagarbeit  $A$  auf den Probenquerschnitt (in  $\text{cm}^2$ ) zu beziehen. Bei ungekerbten Proben ist also die Schlagbiegefestigkeit

$$a_n = \frac{A_n}{b \cdot h}$$

( $b$  Breite,  $h$  Dicke der Probe in cm).

Bei gekerbten Proben ist die Kerbzähigkeit

$$a_k = \frac{A_k}{b \cdot h}$$

( $h$  Dicke der Probe im kleinsten Querschnitt, also in der Kerbzone).

Bei genauer Innehaltung der vorgeschriebenen Abmessungen ist

$$a_n = \frac{A_n}{1,5 \cdot 1} = \frac{2}{3} A_n$$

$$a_k = \frac{A_k}{1,5 \cdot 0,67} = A_k.$$

Bei der Bestimmung der Kerbzähigkeit an wenig spröden Stoffen, insbesondere bei solchen mit groben Füllstoffen (z. B. Typ M, T2, T3), kann es vorkommen, daß die Kerbzähigkeit größer als die Schlagbiegefestigkeit ist,  $KZ$  also kleiner als 1 wird. Diese scheinbar widerspruchsvolle

Tatsache dürfte im wesentlichen darauf zurückzuführen sein, daß bei diesen Stoffen die Voraussetzungen, die für die Umrechnung zugrunde gelegt werden, nicht zutreffen. Man bezieht nämlich die gefundene Schlagarbeit auf den Querschnitt, also auf eine Fläche. Man setzt voraus, daß einmal der Bruch der Probe genau quer zur Stabachse glatt verläuft und zum andern, daß die gesamte Schlagarbeit für die Trennarbeit im

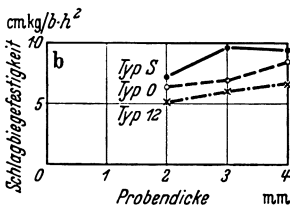
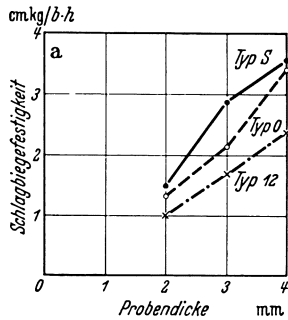


Abb. 135 a und b. Einfluß der Probendicke auf die Schlagbiegefestigkeit; a bei Beziehung der verbrauchten Schlagarbeit auf den Querschnitt ( $b \cdot h$ ); b bei Beziehung auf eine Volumengröße ( $b \cdot h^2$ ).

hat man die bisher übliche Art der Berechnung bei Normalkörpern bis auf weiteres beibehalten.

Lediglich bei der Berechnung der Schlagwerte beim Dynstat-Gerät war man mit Rücksicht auf die in weiten Grenzen schwankenden Probendicken (1,0 bis 4,5 mm) gezwungen, die Schlagarbeit auf  $b \cdot h^2$  zu beziehen, denn bei vielen Stoffen erhält man bei dieser Berechnungsart — unabhängig von der Probendicke — ziemlich gut übereinstimmende Werte, während bei Berücksichtigung des Querschnittes die Werte mit abnehmender Dicke stark abnehmen (vgl. Abb. 135a und b). Allerdings ist nicht bei allen Stoffen diese Berechnungsart befriedigend, insbesondere bei wenig spröden Stoffen erhält man Werte, die bei kleinen Dicken zu hoch liegen.

<sup>1</sup> Vgl. SCHOB, NITSCHKE, SALEWSKI: Plast. Massen Bd. 5 (1935) S. 353 u. Bd. 6 (1936) S. 1.

In den Vereinigten Staaten ist man diesen Schwierigkeiten aus dem Weg gegangen, indem man sich darauf beschränkt hat, Schlagbiegeversuche *nur* an solchen Normalkörpern auszuführen, deren Dicke genau vorgeschrieben und innezuhalten ist, und die gemessenen Schlagarbeiten *nicht* umzurechnen.

Versuchsanordnungen. Für die Ausführung des Schlagbiegeversuches kommen drei Arten in Betracht:

1. Nach CHARPY. Hierbei ruht die Probe horizontal auf zwei Stützen und wird von einem frei fallenden Pendel, dessen Schlagfinne in Probenmitte auftrifft, zerschlagen (vgl. Abb. 142).

2. Nach IZOD. Bei dieser Ausführung wird die Probe einseitig senkrecht zur Hälfte eingespannt; der freie Teil eines Pendelschlagwerkes zerschlagen (vgl. Abb. 143).

3. Nach SCHOB, NITSCHKE, SALEWSKI. Bei der im Dynstat-Gerät (s. S. 200) vorgesehenen Ausführung wird die Probe einseitig annähernd senkrecht in eine Haltevorrichtung eingesetzt, also nicht eingespannt, so daß die Probe sich beim Schlag über die ganze Länge frei durchbiegen kann, bevor der Bruch eintritt (vgl. Abb. 146, S. 220). Im übrigen ähnelt die Ausführung der von Izod.

Die Anzeige der bei der Charpy-Prüfung verbrauchten Schlagarbeit ist im allgemeinen ein wenig größer als bei der Izod-Prüfung, jedoch sind die relativen Anzeigen ähnlich. Bei der Charpy-Prüfung besteht die Neigung, daß die zerbrochenen Probenhälften infolge ihrer Größe den Hammer stören. Die Izod-Prüfung gestattet je gepreßten Stab zwei Prüfungen. Man kann, ohne eine Beeinträchtigung der Meßergebnisse befürchten zu müssen, z. B. die beiden Hälften des bereits auf Biegefestigkeit geprüften Stabes zur Izod-Prüfung benutzen. Da dies sehr wirtschaftlich ist, wird das Izod-Gerät in den angelsächsischen Ländern im allgemeinen öfter benutzt als das Charpy-Gerät.

Bei allen drei Ausführungen sind sowohl ungekerbte als auch gekerbte Proben üblich. Bei gekerbten Proben üben Kerbform, -tiefe und -schärfe einen starken Einfluß aus (vgl. Abb. 136 bis 139), dagegen scheint die Gestalt des Prüfkörpers nur geringen Einfluß zu haben, wie

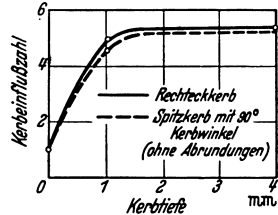


Abb. 136. Einfluß der Kerbtiefe bei Typ K auf die Kerbeinflußzahl an Proben nach Abb. 134 b, c.

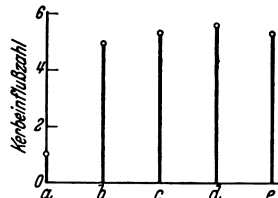


Abb. 137. Einfluß der Kerbform bei Typ K auf die Kerbeinflußzahl an Proben nach Abb. 134b, c. a ungekerbt, b Kerbwinkel 120° c 90°, d 45°, e LI-Kerb.

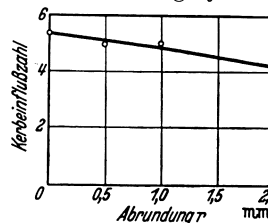


Abb. 138. Einfluß der Kerbschärfe bei Typ K auf die Kerbeinflußzahl an Proben nach Abb. 134c.

Vergleichsversuche mit gekerbten Normalstäben und „Zapfenkörper“ nach ZEBROWSKI (Abb. 134 b bis d) gezeigt haben<sup>1</sup>. Obwohl die Versuche am Zapfenkörper mittels des Dynstat-Gerätes und die Versuche am gekerbten Normalstab mittels eines Normal-Pendelschlagwerkes nach CHARPY ausgeführt wurden, waren die Ergebnisse weitgehend übereinstimmend, sofern nur der Kerbgrund genügend scharf war. Einen sehr starken Einfluß hat die Lage des Kerbes im Normalstab; im allgemeinen liegt die Kerbzähigkeit wesentlich niedriger, wenn der Kerb in Preßrichtung oder quer zur Schichtrichtung verläuft als umgekehrt.

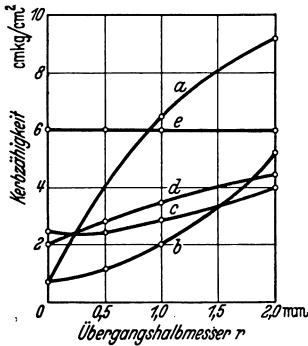


Abb. 139. Einfluß der Kerbschärfe auf die Kerbzähigkeit an Proben nach Abb. 134 d: a Preßharz, b Typ 11, c Typ 12, d Typ S, e Typ Z1.

In Deutschland hat man auf Vorschlag des StMPA als Prüfkörper zur Bestimmung der Kerbzähigkeit den Normalstab gewählt, in den ein 2 mm breiter und 3,3 mm tiefer  $\perp$ -Kerb in Probenmitte in die  $15 \times 120$  mm<sup>2</sup>-Fläche eingepreßt oder eingearbeitet wird, wobei der Kerbgrund möglichst scharf sein soll (Abb. 134b). Bei Proben für das Dynstat-Gerät ist der Kerb entsprechend anzubringen (Tiefe =  $\frac{1}{3}$  der Probendicke).

In den Vereinigten Staaten hat man den V-Kerb mit 45° Kerbwinkel und 0,25 mm Radius am Kerbgrund gewählt (ähnlich Abb. 134 c), obwohl

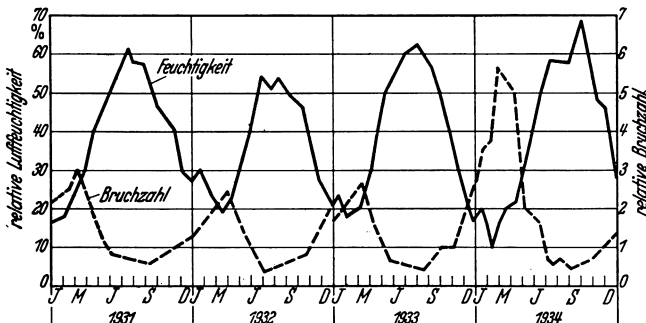


Abb. 140. Zusammenhang von Bruchgefahr und relativer Luftfeuchtigkeit bei Teilen aus Isolier-Preßstoffen.

man erkannt hat, daß vor allem ein *scharfer* Kerb wichtig ist, um die Kerbempfindlichkeit aufzuzeigen<sup>2</sup>.

Bei den Versuchen ist auf Grund amerikanischer Untersuchungen der *Feuchtigkeitseinfluß* zu beachten<sup>2</sup>. Der Feuchtigkeitsgehalt der Proben beeinflusst die Schlagwerte sehr stark.

<sup>1</sup> NITSCHKE u. ZEBROWSKI: Plast. Massen Bd. 8 (1938) S. 33 u. 65.

<sup>2</sup> BURNS, R. u. W. W. WERRING: Modern Plastics Bd. 15 (Aug. 1938) S. 33 u. 65.

Unterschiede im Feuchtigkeitsgehalt der Proben von wenigen Zehntelprozent verursachten Unterschiede von mehr als 25 bis 50% in den Kerbzähigkeitswerten. Will man vergleichbare Prüfungsergebnisse erhalten, so ist eine Konditionierung der Proben erforderlich, damit die verschiedenartige Vorgeschichte der Proben ausgeglichen wird.

Dieser zuerst an Probekörpern beobachtete Feuchtigkeitseinfluß ist seitdem auch bei Brucherscheinungen an Preßteilen in der Praxis festgestellt worden. Abb. 140 zeigt den Zusammenhang zwischen der Bruchgefahr von Kunstharz-Preßteilen und der relativen Luftfeuchtigkeit der umgebenden Atmosphäre. Abb. 141 zeigt die Wirkung der Feuchtigkeit auf die mechanischen Festigkeitseigenschaften von Phenolkunstharz-Preßstoff, wobei der stärkere Anstieg der Kerbzähigkeitswerte mit zunehmendem Feuchtigkeitsgehalt der Proben bemerkenswert ist.

Der Einfluß der Konditionierung ist in den Vereinigten Staaten berücksichtigt worden. Will man bei der Prüfung reproduzierbare Ergebnisse erhalten, so ist eine Konditionierung der Proben vor der Prüfung unerlässlich. Eine 48stündige Erwärmung auf 50° C in trockener Luft hat sich bei Kunstharz-Preßstoffen bewährt. Hierbei erhält man einen Trocknungsgrad der Proben, wie er in trocknen Innenräumen in der Praxis vorkommen kann. Irgendwelche vorangegangenen atmosphärischen Einflüsse werden auf diese Weise ausgeschlossen. Andere Behandlung, z. B. Lagerung bei niedriger Luftfeuchtigkeit und Zimmertemperatur führen zwar auch, aber sehr langsam zum Ziel und sind deshalb unpraktisch. Vor und bei der Prüfung ist darauf zu achten, daß die Proben die Raumtemperatur angenommen haben, da vor allem nichthärtbare organische Isolierstoffe sehr temperaturempfindlich sind. Daher ist auch die Raumtemperatur von 20° auf ± 2° konstant zu halten.

**Prüfgeräte.** a) Nach CHARPY. Der starke Einfluß der Schlaggeschwindigkeit bedingt die Verwendung genormter Prüfgeräte. In Deutschland sind die Schlagwerke zwar noch nicht genormt. Im allgemeinen werden jedoch die sog. „Normal-Pendelschlagwerke“ nach CHARPY, Bauart

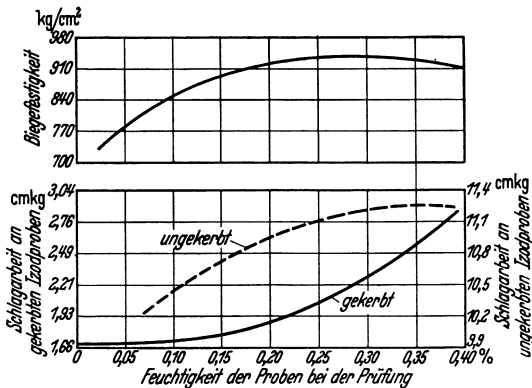


Abb. 141. Einfluß des Feuchtigkeitsgehaltes auf die mechanischen Eigenschaften von Phenol-Kunstharz-Preßstoff.

SCHOPPER, verwendet, so daß bei Schlagwerken gleichen Arbeitsinhaltes gleichartige Versuchsbedingungen vorliegen. Ursprünglich hatte man einheitlich ein Pendelschlagwerk von 150 cmkg Arbeitsinhalt mit Rücksicht auf die schlagfesten Isolierstoffe (Hartpapier u. a.) vorgesehen. 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 früheren „Kommission für Isolierstoffe“ des VDE das in Abb. 142 dargestellte Pendelschlagwerk gebaut, das mit zwei auswechselbaren Pendeln von 10 und 40 cmkg Arbeitsinhalt versehen ist. Das Schlagwerk hat folgende Hauptabmessungen (Tabelle 19).

Tabelle 19.

	Pendel für 10 cmkg	Pendel für 40 cmkg
Schlagwinkel . . . . .	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 mm	391,8 mm
Abstand der Schneidenmitte von der Pendelachse . . . . .	225 mm	225 mm

Das 10-cmkg-Pendel wird bei besonders schlagempfindlichen Isolierstoffen benutzt, das 40-cmkg-Pendel dagegen bei der Mehrzahl der Isolierstoffe. Der Apparat ist außer mit Auflagern für Normalstäbe auch noch mit Auflagern für  $5 \times 5 \times 60$ -mm<sup>3</sup>-Stäbe eingerichtet. Das 150-cmkg-Pendelschlagwerk wird für Stoffe hoher Festigkeit benutzt. Bei einigen Kunststoffen (Polymerisaten) ist zuweilen die Anwendung eines 10-mkg-Schlagwerkes notwendig. Dringend erwünscht ist die zur Zeit vielfach noch fehlende Festlegung, für welche Stoffgruppen die einzelnen Schlagwerke zu verwenden sind.

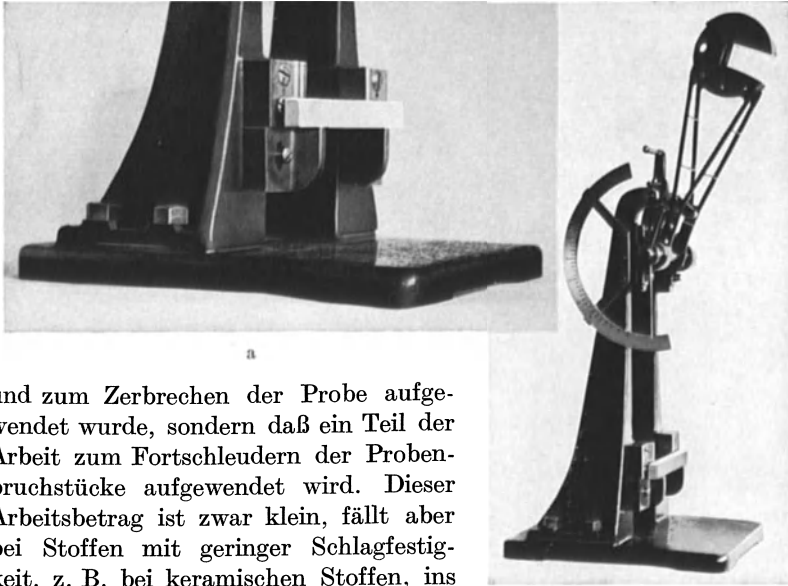
Das Pendel (Abb. 142) fällt bei Auslösung einer Klinke aus einem Schlagwinkel von 160°. In der tiefsten Stellung trifft es auf die Probe und schwingt, nachdem es die Probe durchschlagen hat, auf der anderen Seite durch. Aus der Steighöhe ergibt sich der nach dem Bruch der Probe im Pendel noch vorhandene Arbeitsinhalt. Die Steighöhe wird an einer Skala mittels Schleppzeigers abgelesen. Früher war die Skala in Winkelgrade geteilt, während jetzt auf Veranlassung von A. SCHOB fast stets die Teilung in cmkg erfolgt. Die Ablesung gibt also unmittelbar die von der Probe verbrauchte Schlagarbeit in cmkg.

Die Reibung des Pendels und des Schleppzeigers ist in den Teilungen der Skala für die Steighöhe bei dem 10- und 40 cmkg-Pendelschlagwerk bereits berücksichtigt, so daß besondere Abzüge für den Leerlaufverlust



nicht zu machen sind<sup>1</sup>. Zweckmäßig ist es, von Zeit zu Zeit festzustellen, ob sich nicht die Reibung des Kugellagers und Schleppzeigers geändert hat. Bei guter Instandhaltung des Apparates treten allerdings kaum Änderungen auf. Für genau senkrechte Aufstellung des Apparates auf genügend fester Unterlage ist Sorge zu tragen.

Bei der Bewertung der Ergebnisse ist zu berücksichtigen, daß die abgelesene, verbrauchte Schlagarbeit nicht ausschließlich zur Durchbiegung



und zum Zerbrechen der Probe aufgewendet wurde, sondern daß ein Teil der Arbeit zum Fortschleudern der Probenbruchstücke aufgewendet wird. Dieser Arbeitsbetrag ist zwar klein, fällt aber bei Stoffen mit geringer Schlagfestigkeit, z. B. bei keramischen Stoffen, ins Gewicht<sup>2</sup>.

Das in den Vereinigten Staaten vorgeschriebene Schlagwerk nach CHARPY unterscheidet sich von den entsprechenden deutschen durch wesentlich höhere Schlaggeschwindigkeit, da die Fallhöhe 61 cm statt 33 bzw. 39 cm bei deutschen Geräten mit 10 bzw. 40 cmkg Arbeitsinhalt beträgt.

Nach amerikanischen Untersuchungen<sup>3</sup> beeinflussen Änderungen des Arbeitsinhaltes der Geräte zwischen 27,6 und 69 cmkg die Prüfungsergebnisse nicht merklich, aber bei einem Gerät von nur 6,9 cmkg Arbeitsinhalt wird die verbrauchte Schlagarbeit um mehr als 25% höher angezeigt als bei einem Schlagwerk von 27,6 cmkg Arbeitsinhalt. Diese

Abb. 142 a und b. Pendelschlagwerk nach CHARPY, Bauart Schopper. a Probenanordnung, b Gerät mit Probe.

<sup>1</sup> Vgl. dazu W. MOSER: Kunststoffe Bd. 28 (1938) S. 267.

<sup>2</sup> Vgl. O. BARTSCH: Ber. dtsh. keram. Ges. Bd. 17 (1936) S. 281—335; Bd. 18 (1937) S. 465—489; ferner F. UEBEL: Gießerei Bd. 24 (1937) S. 413.

<sup>3</sup> BURNS, R. u. W. W. WERRING: Modern Plastics, Bd. 15 (Aug. 1938) S. 33.

Abweichung ist ein Beweis für die Geschwindigkeitswirkung. Eine Vergrößerung des Hammergewichtes bei den kleineren Prüfgeräten führt zum Ausgleich dieser Differenz. Auf diese Erfahrungen gestützt, hat man die heute gebräuchlichen Prüfgeräte für einen Arbeitsinhalt von 27,6 cmkg und eine Fallhöhe von 61 cm konstruiert. Durch Anbringen von Zusatzgewichten an den Seiten des Hammers kann der Arbeitsinhalt auf 55 bzw. 70 cmkg erhöht werden.

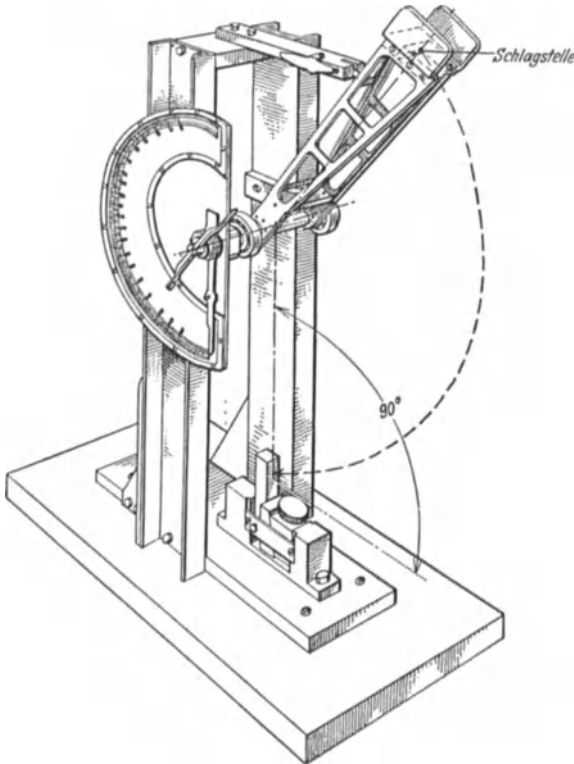


Abb. 143. Pendelschlagwerk nach IZOD.  
A.S.T.M. D 256—38.

Die amerikanischen Beobachtungen über den Geschwindigkeitseinfluß bestätigen die Ergebnisse entsprechender deutscher Untersuchungen von W. KUNTZE und R. NITSCHÉ<sup>1</sup>.

b) Nach IZOD. Das Pendelschlagwerk nach IZOD unterscheidet sich von dem nach CHARPY durch die Probenanordnung (vgl. Abb. 143). Das Gerät ist in den angelsächsischen Ländern sehr gebräuchlich und entspricht in wesentlichen Daten (Arbeitsinhalt, Schlaggeschwindigkeit) dem in Amerika verwendeten Gerät nach CHARPY (s. vorstehende Ausführungen unter a).

c) Nach SCHOB, NITSCHÉ, SALEWSKI. Diese

Ausführung ist im Dynstat-Gerät vorgesehen, das bereits im Abschnitt „Biegeversuch“ (S. 200) beschrieben wurde. Die Einstellung des Gerätes für den Schlagversuch zeigt Abb. 146, S. 220.

**Versuchsausführungen.** Die Ausführung des Schlagversuches hat nur Zweck bei Isolierstoffen, die beim Versuch brechen, d. h. spröden Charakter haben. Bei Stoffen, die sich beim Versuch lediglich stark durchbiegen ohne zu brechen, ist eine sichere Messung der von der Probe verbrauchten Arbeit nicht möglich.

<sup>1</sup> KUNTZE, W. u. R. NITSCHÉ: Kunststoffe Bd. 29 (1939) S. 33—41.

## Deutsche Vorschriften.

## 1. Allgemeine Vorschriften für feste Isolierstoffe (VDE 0320).

a) Die Schlagbiegefestigkeit wird am Normalstab ( $120 \times 15 \times 10 \text{ mm}^3$ ) ermittelt, der bei 70 mm Stützweite mit einem Normalpendelschlagwerk (s. S. 216) geschlagen wird. Die Schlagfinne soll einen Schneidwinkel von  $45^\circ$  mit der Abrundung  $r = 5 \text{ mm}$  besitzen; die Auflagerkanten (Abb. 144) müssen hinterschnitten sein nach einem Winkel von  $15^\circ$  und mit einer Abrundung von  $r = 3 \text{ mm}$ ; Angaben in  $\text{cmkg/cm}^2$ .

b) Kerbzähigkeit. Als Prüfkörper für die Bestimmung der Kerbzähigkeit mittels eines normalen Pendelschlagwerkes dienen Normalstäbe, in die durch Sägen, Fräsen oder dgl. ein ungefähr 2 mm breiter  $\square$ -Kerb in der Mitte einer der 15 mm breiten Flächen quer, d. h. senkrecht zur Stabachse eingearbeitet wird (s. Abb. 134b). Die Kerbtiefe wird so gewählt, daß der Restquerschnitt  $1 \text{ cm}^2$  beträgt, d. h. die Kerbtiefe rd. 3,3 mm ist. Der Kerbgrund soll möglichst keine Abrundungen aufweisen; der höchstzulässige Abrundungsradius muß unter 0,2 mm bleiben. Der Stab wird mittels des 40-cmkg-Normalpendelschlagwerkes bei  $20 \pm 2^\circ$  geschlagen, wobei selbstverständlich der Kerb der Schlagfinne abgewandt ist. Zu beachten ist hierbei, daß die Kerbmitte genau in der Mittelebene des schlagenden Pendels liegen muß.

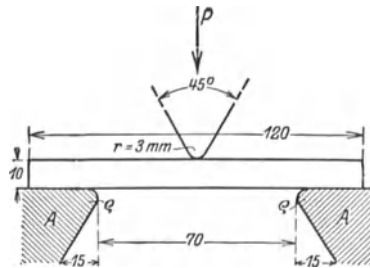


Abb. 144. Bestimmung der Schlagbiegefestigkeit nach VDE 0302.

2. Sondervorschrift für keramische Isolierstoffe<sup>1</sup>.

Der Verband Deutscher Elektrotechnischer Porzellanfabriken (VDEP) sieht beim Schlagversuch nur die Bestimmung der *Schlagbiegefestigkeit*, nicht aber der Kerbzähigkeit vor.

Die Schlagbiegefestigkeit wird für stranggepreßte oder gegossene Isolierstoffe an zylindrischen, 120 mm langen Stäben mit 10 mm Dmr. mit dem Normalpendelschlagwerk von 10 cmkg Arbeitsinhalt ermittelt (s. S. 216); für gepreßte Isolierstoffe werden Stäbe mit annähernd ovalem Querschnitt verwendet (größte Dicke 10 mm, kleinste 8 mm), wobei Preß- und Schlagrichtung übereinstimmen sollen.

## 3. Sondervorschriften für Hartgummi (VDE 0322) (auch für nichthärtbare formfeste Kunststoffe geeignet).

Die bisherige Vorschrift beschränkt sich auf die Bestimmung der *Schlagbiegefestigkeit*, die entsprechend den unter 1 angegebenen

<sup>1</sup> VDE-Vorschrift in Bearbeitung.

Vorschriften ausgeführt wird, jedoch nicht am Normalstab sondern am Kleinstab,  $5 \times 5 \times 50 \text{ mm}^3$ , in der Anordnung nach Abb. 145.

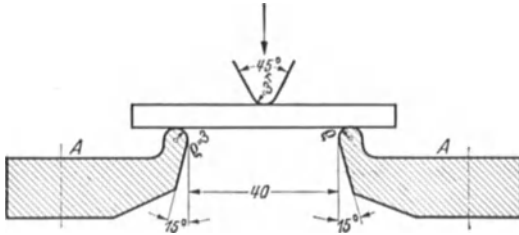


Abb. 145. Anordnung beim Schlagbiegeversuch an Hartgummi nach VDE 0322.

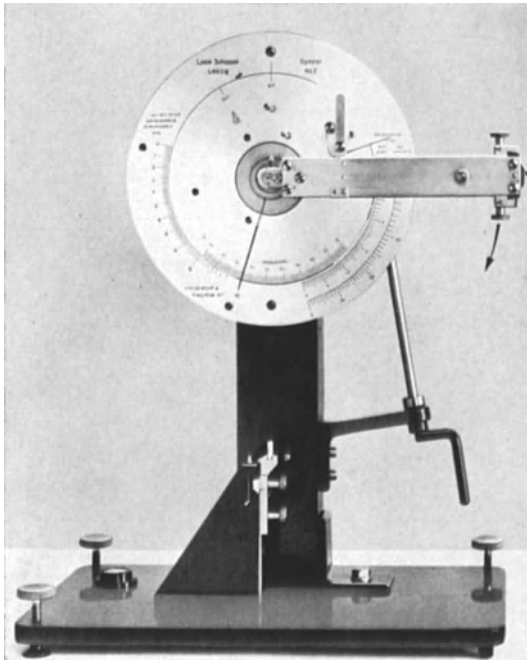


Abb. 146. Dynstat-Gerät, eingestellt für den Schlagbiegeversuch.

Für nichthärtbare Kunststoffe wird voraussichtlich der „Norm-Kleinstab“,  $4 \times 6 \times 50 \text{ mm}^3$ , eingeführt werden.

#### 4. Schlagbiegeversuch am Dynstat-Gerät (bisher noch nicht Vorschrift).

Beim Schlagbiegeversuch mit diesem Gerät (Abb. 146 und 127 C, S. 201) wird zunächst (nach Entfernen der Einspannvorrichtung  $m_1$  für den Biegeversuch) die Einspannvorrichtung  $b$  auf 7 mm freie Probenlänge eingestellt; die gleichfalls einstellbaren freien Probenlängen von 5 und 9 mm sind lediglich zur Untersuchung des Einflusses der freien Probenlänge auf die Schlagbiegefestigkeit vorgesehen. Das Pendel  $a$  mit Zusatzgewicht (wahlweise 10 cmkg oder 20 cmkg Arbeitsinhalt) wird in die Klinke  $f$  eingeklinkt und auf  $90^\circ$  Fallhöhe mittels der

Kurbel  $e$  eingestellt. Die gleichfalls einstellbare Fallhöhe von  $60^\circ$ , bei der sich bei Verwendung des kleinen Zusatzgewichtes ein Arbeitsinhalt von 5 cmkg, bei Verwendung des großen Gewichtes ein Arbeitsinhalt von 10 cmkg ergibt, ist nur zur Untersuchung des Einflusses der Schlaggeschwindigkeit vorgesehen. Der Schleppzeiger  $k$  wird auf den Nullpunkt der Teilung  $i$  gestellt. Die  $10 \times 15 \text{ mm}^2$  große, 1 bis 4 mm dicke Schlagprobe wird in die Einspannvorrichtung  $b$  mit Hilfe der

Stellschraube so eingesetzt, daß sie leicht nach links geneigt ist und die obere Kante der Einspannung  $b$  sowie die Endfläche der Stellschraube berührt. Das Pendel wird ausgeklinkt und fällt nach links, wobei die Schlagnase  $c$  die Probe zerschlägt. Die von der Probe verbrauchte Schlagarbeit wird vom Schleppzeiger  $k$  in cmkg angezeigt (als Unterschied zwischen Fall- und Steighöhe des Pendels). Zweckmäßig sind häufige Leerversuche zur Feststellung der Schleppzeiger-Reibung anzustellen.

Schlagbiegefestigkeit. Die in cmkg gemessene verbrauchte Schlagarbeit wird durch das Widerstandsmoment der Probe dividiert, d. h. bei rechteckigem Probenquerschnitt durch  $bh^2/6$  (Abb. 135a, b, S. 212; eine theoretische Begründung hierfür fehlt allerdings. Der Faktor  $1/6$  bleibt jedoch aus zwei Gründen zweckmäßig fort: erstens wird die Rechnung vereinfacht und zweitens ergeben sich vielfach Zahlenwerte, die nahe bei denen liegen, die für die bisherige Typisierung der Preßstoffe (vgl. S. 285) auf Grund der Beziehung der Schlagarbeit auf die Querschnittseinheit des Normalstabes gelten. Außerdem bleiben die am Normalstab ermittelten Werte unverändert, wenn sie statt auf  $bh$  auf  $bh^2$  bezogen würden, da beim Normalstab  $h = 1$  ist:

Demnach ist zur Berechnung der Schlagbiegefestigkeit die in cmkg gemessene Schlagarbeit  $A_n$  durch  $bh^2$  zu dividieren:

$$\text{Schlagbiegefestigkeit } a_n = \frac{A_n}{bh^2},$$

wobei  $b$  Breite,  $h$  Dicke der Probe in cm ist.

Kerbzähigkeit. Für die Prüfung am Dynstat-Gerät kann neben den üblichen  $10 \times 15$  mm<sup>2</sup>-Proben, deren  $\perp$ -Kerbtiefe  $1/3$  der Dicke ist, und deren Kerbmitte beim Versuch in Höhe der oberen Einspannkante liegt, auch der von ZEBROWSKI vorgeschlagene Zapfenkörper mit den Abmessungen nach Abb. 134d, S. 210, benutzt werden. Er besteht aus einem Würfel von 15 mm Kantenlänge mit einem Zapfen von  $10 \times 10 \times 5$  mm<sup>3</sup>, der nach drei Seiten ohne Abrundungen stark abgesetzt ist. Bei der Prüfung wird der Würfel fest eingespannt und der Zapfen in der durch den Pfeil angegebenen Richtung abgeschlagen. Aus der gefundenen Schlagarbeit erhält man unter Bezug auf die Grundfläche des Zapfens für jeden Preßstoff einen spezifischen Wert, welcher mit der an gekerbten Stäben festgestellten Kerbzähigkeit annähernd übereinstimmt. Der Körper kann entweder fertig gepreßt oder aus dem Vollen herausgearbeitet werden, wobei  $r$  (Abb. 134 d) = 0 sein soll.

#### Britische Vorschriften.

##### *Isolierpreßstoffe* (BERA, B/S 1).

In den Vorschriften ist nur die Prüfung auf Kerbzähigkeit (toughness, absence of brittleness) angegeben.

Probenform. a) Gepreßter Stab  $15 \times 15 \times 80$  mm<sup>3</sup> mit eingepreßtem Kerb.

b) Geschnittener Stab (Abb. 147) mit Kerb, hergestellt durch 5 mm tiefen Sägeschnitt, der in eine Bohrung von  $d=1$  mm ausläuft. Mit Rücksicht auf die Richtungsabhängigkeit sind die Stäbe teils so zu kerben, daß der Kerbgrund parallel, teils so, daß der Kerbgrund rechtwinklig zur Preßhautoberfläche liegt.

Die Pendelgeschwindigkeit soll 180 bis 220 cm/s betragen. Der nach dem Versuch unverbrauchte Arbeitsinhalt des Pendels soll  $\geq 25\%$  des gesamten Arbeitsinhaltes sein. Die von der Probe verbrauchte Arbeit wird in  $\text{cmkg/cm}^2$  angegeben.

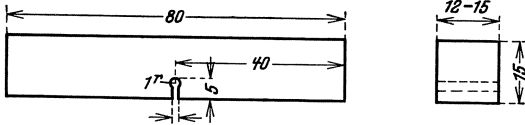


Abb. 147. Prüfkörper für Schlagbiegeversuche nach BERA, B/S1, herausgeschnitten aus Platte oder Stange.

Außer diesen Vorschriften sind die neuen britischen Normen für

Kunstharz-Preßstoffe<sup>1</sup> zu beachten, nach denen die *Kerbzähigkeit* entsprechend den amerikanischen Vorschriften bestimmt wird (s. S. 223).

#### Amerikanische Vorschriften.

1. *Keramische Isolierstoffe*. (A.S.T.M. D 116—34, 18 und A.S.T.M. D 256—34 T).

Schlagbiegefestigkeit (resistance to impact).

Probenform. Rundstab, 152 mm lang, Dmr. wahlweise je nach dem Fertigerzeugnis 12,7, 19,1 oder 28,6 mm.

Ausführung. Nach CHARPY am ungekerbten Stab entsprechend der Prüfung von Isolierpreßstoffen (vgl. folgenden Abschnitt 2a), jedoch ohne thermische Vorbehandlung.

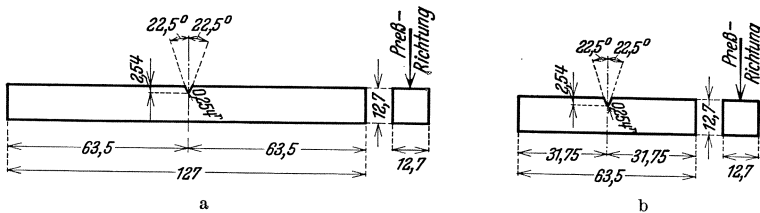


Abb. 148 a und b. Amerikanische Prüfkörper für Schlagbiegeversuche (A.S.T.M. D 256—32 T). a für den Versuch nach CHARPY, b für den Versuch nach Izod.

2. *Isolierpreßstoffe*. (A.S.T.M. D 48—33, 14 und A.S.T.M. D 256—34 T).

Probenform. a) Bei Versuchsausführung nach CHARPY ungekerbter oder gekerbter Stab nach Abb. 148a ( $127 \times 12,7 \times 12,7$  mm<sup>3</sup>, Kerbwinkel  $45^\circ$ , Kerbtiefe 2,5 mm, Abrundung des Kerbgrundes  $r=0,25$  mm, Preßrichtung abweichend von der Abbildung in Richtung des Kerbgrundes).

<sup>1</sup> British Standard Specification (B.S.S.) Nr. 771. London 1938.

b) Bei Versuchsausführung nach IzOD gekerbter Stab nach Abb. 148 b ( $63,5 \times 12,7 \times 12,7 \text{ mm}^3$ , Kerb und Preßrichtung wie bei a).

Der Kerb bei a) und b) kann eingepreßt, eingesägt oder eingefeilt werden, der Kerbgrund muß glatt, gerade und rißfrei sein.

Ausführung. a) Nach CHARPY. Die Proben werden vor dem Versuch 48 h bei  $50 \pm 5^\circ \text{ C}$  vorbehandelt und anschließend auf Raumtemperatur im Exsikkator abgekühlt. Fünf ungekerbte *oder* gekerbte Stäbe werden bei rd.  $20^\circ$  mittels eines Pendelschlagwerkes nach CHARPY geschlagen.

Die Schlaggeschwindigkeit soll 3,35 m/s betragen. Die Schlagfinne soll keilförmig ( $45^\circ$ -Winkel) mit einer Abrundung von  $r = 3,2 \text{ mm}$  sein. Die Auflager-Innenkanten haben die gleiche Abrundung; die Auflagerentfernung ist 101,6 mm.

Der Schlag soll auf Probenmitte treffen; bei gekerbten Proben ist der Kerb der Schlagfinne abgewandt.

b) Nach IzOD. Verwendet wird ein Schlagwerk nach IzOD (Abb. 143, S. 218), dessen Schlagfinne nicht abgerundet ist. Die Entfernung zwischen Unterkante der Finne und Oberkante der Einspannung im Moment des Schlages soll 22 mm betragen. Verwendet werden nur gekerbte Proben; die Probe wird so eingespannt, daß der Kerb der Schlagfinne zugewandt ist und der Kerbgrund genau in Höhe der Oberkante der Einspannung liegt.

Im Prüfungsergebnis nach a) und b) sind anzugeben: Verfahren, Probenform und bei geschichteten Materialien die Prüfrichtung, die verbrauchte Schlagarbeit in cmkg; eine Umrechnung auf den Querschnitt findet *nicht* statt.

Diese amerikanischen Vorschriften haben den Mangel, daß sie offen lassen, welches Verfahren und welche Probenform (ungekerbt oder gekerbt) anzuwenden sind.

#### Französische Vorschriften.

##### *Isolierpreßstoffe.*

Schlagbiegefestigkeit (résistance à la rupture par choc,  
U.S.E. 1937/38—46 S. 1006).

Probekörper. Stab,  $15 \times 15 \times 100 \text{ mm}^3$  (Hälften des 200 mm langen französischen Normalstabes).

Ausführung. 6 Stäbe werden frühestens 24 h nach dem Pressen ohne weitere Vorbehandlung ähnlich VDE 0302 geprüft. Verwendet wird je nach der Schlagfestigkeit eines der folgenden Pendelschlagwerke nach CHARPY (s. Tabelle 20):

Tabelle 20.

	I ohne	II mit	
	Zusatzgewicht		
Arbeitsinhalt (cmkg) . . . . .	25	50	
Gewicht der Pendelmasse (g) . . . . .	515,5	1031,1	
Schwerpunkts-Abstand von der Pendelachse (mm) . . . . .	250	250	
Länge des einfachen Synchronpendels (mm) . . . . .	262	262	
Schlagwinkel ( $\sphericalangle$ ) . . . . .	160	160	
Stützweite (mm) . . . . .	70	70	
Stützen {	Schneidenwinkel ( $\sphericalangle$ ) . . . . .	90	90
	Abrundung $r$ (mm) . . . . .	2,5	2,5
Schlagfinne {	Schneidenwinkel ( $\sphericalangle$ ) . . . . .	75	75
	Abrundung $r$ (mm) . . . . .	2,5	2,5

Angegeben wird das Mittel aus den erhaltenen 6 Werten in cmkg ohne Umrechnung.

### g) Dauerversuche.

Mechanische Dauerversuche sollen den *Einfluß der Zeit* auf die Festigkeit der Isolierstoffe erkennen lassen. Für die Anwendung der Isolierstoffe sind die Versuche insofern von Bedeutung, als sie auch einen Einblick in die elastischen Nachwirkungserscheinungen, die durch kurzzeitige Versuche meist nur annähernd erfaßt werden können z. B. in das „Kriechen“ von Kunststoffen geben.

Man unterscheidet je nach der Art der Beanspruchung

α) Dauerversuche bei ruhender Beanspruchung,

β) Dauerversuche bei wechselnder Beanspruchung.

Bei ruhender Beanspruchung spricht man auch von „Dauerstandversuchen“, bei denen der Stoff dauernd entweder auf Zug, Biegung, Verdrehung oder Druck beansprucht wird. Bei wechselnder Beanspruchung wird der Stoff entweder auf Zug oder auf Biegung oder auf Verdrehung beansprucht, wobei in der Zeiteinheit die Größe der Beanspruchung, die mechanische Spannung, schnell wechselt.

Die Dauerversuche haben bisher noch keinen Eingang in Isolierstoff-Prüfvorschriften gefunden, da die Isolierstoffe erst seit kurzem als mechanisch hochbeanspruchte Baustoffe verwendet werden. Außerdem ist noch nicht genügend geklärt, ob und in welchem Umfang die Ausführung von Dauerversuchen notwendig sein wird, zumal in vielen Fällen für die Isolierstofftechnik die Ergebnisse der kurzzeitigen Versuche ausreichend sein dürften. Daher ist in diesem Buch auf Einzelheiten nur kurz eingegangen worden.

#### α) Dauerversuche bei ruhender Beanspruchung.

Versuche dieser Art geben vor allem Aufschluß über die elastischen oder plastischen Nachwirkungserscheinungen, die auch unter der Bezeichnung „Kriechen“ bekannt sind. Für die Ausführung der Dauer-



versuche eignen sich solche Prüfeinrichtungen, die unmittelbare Belastung mittels Gewichten ermöglichen. Mit diesen Einrichtungen kann die Belastung bis zum Schluß des Dauerversuches konstant gehalten werden.

Versuchsausführungen für Dauerzug-, -druck-, (Kugeldruck-) und -biege-Versuche an Kunststoffen haben THUM und JACOBI veröffentlicht<sup>1</sup>.

### β) Dauerversuche bei wechselnder Beanspruchung.

Unter den möglichen Beanspruchungsarten hat die Beanspruchung auf Biegung bei der Ausführung von Dauerversuchen den Vorteil der verhältnismäßig einfachen Versuchsausführung und der Anlehnung an die am häufigsten vorkommenden praktischen Beanspruchungen.

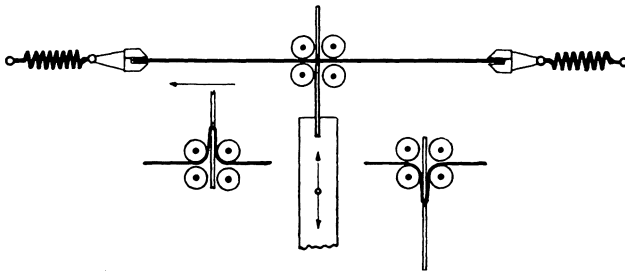


Abb. 149. Probenanordnung und -beanspruchung beim Falzer, Bauart Schopper. (Aus HERZBERG: Papierprüfung, 7. Aufl.)

**Falzversuch.** Ein seit langem bekannter Dauerversuch bei wechselnder Biegebeanspruchung, kombiniert mit Zugbeanspruchung, ist der *Falzversuch*, der jedoch nur für leicht biegsame Stoffe in Betracht kommt. In Isolierstoffvorschriften ist er z. B. in den VDE-Vorschriften für *Preßspan* (VDE 0315) berücksichtigt worden.

Der Versuch ist ursprünglich nur für Papier entwickelt worden, dürfte jedoch für alle Isolierstoffe, die in Form biegsamer Folien Verwendung finden, praktische Bedeutung erlangen. Zwar soll der Versuch in erster Linie dazu dienen, einen Zahlenwert für das Verhalten beim Biegen, Zusammendrücken, Falzen oder Knittern zu liefern, also für eine Beanspruchung, denen folienförmige Isolierstoffe nur selten ausgesetzt sind. Andererseits gibt der Falzversuch jedoch einen guten Einblick in die *Gleichmäßigkeit* des Stoffes.

Ungleichmäßigkeiten offenbaren sich in so starken Streuungen der Einzelwerte, wie sie bei anderen Prüfarten kaum erzielt werden.

Zur Ausführung des Falzversuches eignet sich der Falzer, Bauart Schopper (Abb. 149). Als Probe wird ein 15 mm breiter Streifen aus dem zu prüfenden Isolierstoff (außer Preßspan; Prüfung hierfür s. S. 226) an

<sup>1</sup> Vgl. THUM, A und H. R. JACOBI: Mechanische Festigkeit von Phenol-Formaldehyd-Kunststoffen, VDI-Forsch.-Heft Nr. 396, 1939.

beiden Enden eingespannt (Gesamtlänge 97 mm, freie Einspannlänge 90 mm), wobei auf die Probe ein Höchstzug von 1000 g mittels der mit den Einspannungen verbundenen Federn ausgeübt werden kann. Der Probestreifen wird mittels eines Schiebers und Rollenführung so lange hin und her bewegt und jedesmal dabei gefalzt, d. h. scharf auf Biegung beansprucht, bis Bruch auftritt.

Die Zahl der Falzungen bis zum Bruch wird an einem Zählwerk abgelesen und ist das Maß für das Verhalten beim Falzen<sup>1</sup>.

Der normale Falzer soll nur für Folien bis zu 0,25 mm Dicke benutzt werden, da der Rollenabstand vom Schieberblech nur 0,30 mm beträgt und der Falzer für dickere Sorten nicht gebaut ist.

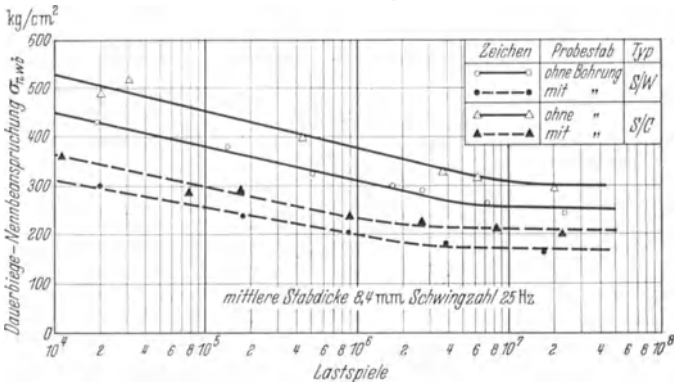


Abb. 150. Wöhler-Kurven für Flachbiegung von Stäben aus Typ S mit und ohne Querbohrung. (Aus VDI-Forsch.-Heft 396.)

Für stärkere Folien von über 0,25 bis 1,40 mm Dicke hat die Firma L. Schopper, Leipzig, einen Falzer mit größerem Rollenabstand gebaut, den sie als Kartonfalzer in den Handel bringt (Rollenabstand vom Schieberblech 2,0 mm, Höchstfederspannung 1,3 kg). Dieser Falzer wird für die Prüfung von Preßspan nach VDE 0315 benutzt. Je fünf  $15 \times 140 \text{ mm}^2$  große Streifen aus Längs- und Querrichtung werden (nach 24 h Lagern bei 65 % relativer Feuchtigkeit) gefalzt, wobei darauf zu achten ist, daß der Feuchtigkeitsgehalt der Proben erhalten bleibt.

**Dauerbiegefestigkeit.** Für die auch als Baustoff geeigneten Isolierstoffe kann bei wechselnden Beanspruchungen in der Praxis die Kenntnis der *Dauerbiegefestigkeit* von Interesse werden. Zur Ermittlung der Dauerbiegefestigkeit wird der zu prüfende Stoff wechselnd auf Biegung beansprucht, d. h. der Prüfstab wird so lange hin- und hergebogen, bis der Stab bricht. Der Grad der Biegung, der die Biegespannung im Stab bestimmt, wird von Versuch zu Versuch stufenweise so weit herabgesetzt, bis auch bei mehr als  $10^8$  Lastspielen kein Bruch

<sup>1</sup> Einzelheiten u. a. in W. HERZBERG: Papierprüfung, S. 64—74. Berlin: Julius Springer 1932.

auftritt. Trägt man die Zahlen, bei denen Bruch auftritt, in Abhängigkeit von den zugehörigen Biegespannungen auf, so erhält man eine Kurve (Wöhler-Kurve), aus deren Verlauf durch Extrapolieren die Dauerbiegefestigkeit ermittelt werden kann (vgl. Abb. 150), d. h. die Biegespannung in  $\text{kg/cm}^2$ , bei der auch bei mehr als  $10^8$  Lastwechseln die Probe nicht mehr bricht. Für die Prüfung fester Isolierstoffe, insbesondere der organischen Kunststoffe, sind die von THUM und JACOBI<sup>1</sup> ausgeführten Versuche verwertbar.

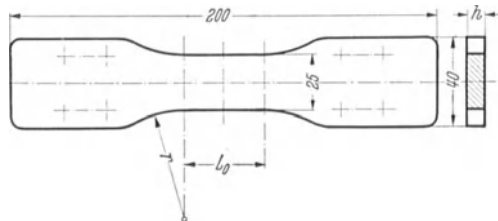


Abb. 151. Probekörper für Dauerbiegeversuch an Kunststoffen.  $L_0 = 38$  mm,  $r = 50$  mm,  $h = 3$  bis 12 mm.

Die Versuche an Kunststoffen wurden an etwa 8 mm dicken Flachstäben nach Abb. 151 ausgeführt; der Stab hat fast die gleiche Form wie der Zugstab für Kunstharz-Preßstoffe nach DIN 7701. Die Dauerprüfmaschinen für Metalle konnten nicht verwendet werden, da die organischen Kunststoffe einen wesentlich kleineren Elastizitätsmodul als Metalle haben, also weniger steif sind. Die Prüfmaschinen müssen daher so gebaut sein, daß sie weite Auslenkungen und damit große

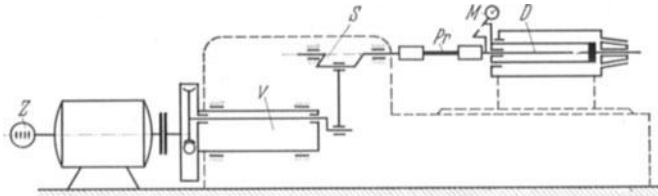


Abb. 152. Flachbiege- und Verdrehmaschine, Bauart Schenck. *D* Dynamometer; *M* Meßuhr; *Pr* Probekörper, eingespannt für Verdrehung; *S* Schwingkurbel; *V* Verstellgetriebe; *Z* Umdrehungszähler an Motorwelle. (Aus VDI-Forsch.-Heft 396.)

Verformungen der Prüfstäbe gestatten, um auch an verhältnismäßig dünnwandigen Proben Dauerbrüche erzielen zu können. Als geeignet haben sich kleine Schencksche Flachbiege- und Verdrehmaschinen für  $\pm 3$  mkg erwiesen (Abb. 152). Bei ihnen wird der Probekörper *Pr* doppelseitig zwischen Antrieb und Kraftmeßeinrichtung eingespannt. Der Antrieb jeder Maschine besteht im wesentlichen aus einer Schwingkurbel *S*, die von einem Doppelsexcenter mit stetig veränderlicher Exzentrizität über eine Pleuelstange bewegt wird (Verstellgetriebe *V*). Die auf den Probekörper ausgeübte Kraft wird mittels eines Stahlstabes (Dynamometer *D*) gemessen, der an seinem einen Ende in einem Stahlgehäuse fest eingespannt ist und auf Drehung beansprucht wird. Das

<sup>1</sup> THUM u. JACOBI: VDI-Forsch.-Heft 1939, S. 396.

auf ihn wirkende Drehmoment wird mit Meßuhren  $M$  ermittelt. Durch eine besondere Einspannvorrichtung kann der Probestab sowohl auf Biegung als auch auf Verdrehung beansprucht werden. Der bei der Biegung des Probestabes auftretenden Verkürzung der Prüflänge wird durch dünne Blattfedern auf der Antriebseite Rechnung getragen (Abb. 153). Bei diesen Maschinen bleibt der größte Ausschlag, den der Probestab erfährt, während der ganzen Versuchsdauer praktisch unverändert; dagegen kann die Kraftanzeige infolge Zerrüttung der Kunststoffproben langsam zurückgehen. Um die verschiedenen Arten der

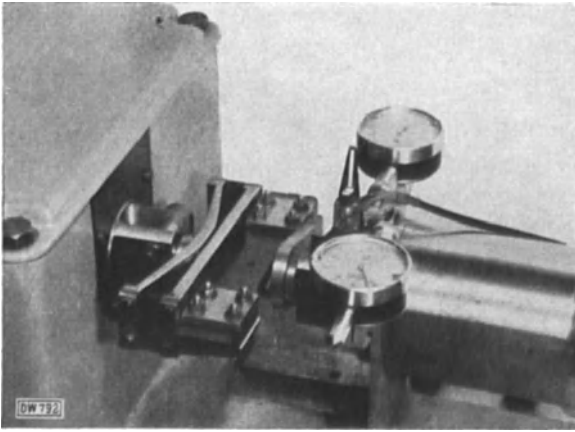


Abb. 153. Flachbiege- und Verdrehmaschine, Bauart Schenck; Einspannvorrichtung für Flachbiegung. (Aus VDI-Forsch.-Heft 396.)

Kunststoffe in ihren Eigenschaften eindeutig miteinander vergleichen zu können, sind Dauerbiegeversuche durchweg gleicher Schwingzahl (25 Hz) durchzuführen.

#### 4. Thermische Prüfungen.

##### a) Allgemeines.

Elektrische Isolierstoffe sind vielfach im Betriebe hohen oder tiefen Temperaturen ausgesetzt. Bei vielen Gebrauchsgegenständen, z. B. bei Koch- und Heizgeräten, bei Kontaktträgern an Schaltgeräten, die durch den Strom erwärmt werden, können hohe Temperaturen kurz- oder langfristig auftreten, die so erhebliche Änderungen des Isolierstoffes bewirken, daß die Betriebssicherheit gefährdet werden kann, wenn ein ungeeigneter Isolierstoff verwendet wurde. An Isolierstoffen, die im Freien verwendet werden, z. B. als Freileitungsisolatoren, Kabelisolierstoffe, können bei tiefen Temperaturen Eigenschaftsänderungen auftreten, die die Verwendbarkeit einiger Isolierstoffe in Frage stellen.

Die Kenntnis der thermischen Eigenschaften und die zweckmäßige Bestimmung dieser Eigenschaften ist daher für die Praxis von fast ebenso großer Bedeutung wie die Kenntnis und Bestimmung der mechanischen Eigenschaften.

Wenn von „thermischen“ Eigenschaften gesprochen wird, so ist klar zu unterscheiden zwischen den

α) physikalisch eindeutigen Eigenschaften, wie Wärmeleitfähigkeit, Wärmeausdehnung usw., also den physikalischen Konstanten, und den

β) technologisch wichtigen Eigenschaften, wie Festigkeit in der Wärme, Verhalten im Feuer oder in der Kälte, also Eigenschaftsänderungen, die der Stoff vorübergehend oder dauernd bei Temperaturänderungen erleidet.

Die erste Gruppe der Eigenschaften umfaßt physikalische Konstanten, deren Ermittlung grundsätzlich nach den bekannten physikalischen Verfahren<sup>1</sup> erfolgen kann.

Bei der Bestimmung dieser Konstanten an Isolierstoffen ist zu beachten, daß einige Stoffe, insbesondere die Polykondensate, ihren Zustand *während* der Messung ändern können, vor allem wenn zur Messung der Stoff auf höhere Temperaturen erwärmt werden muß (vgl. S. 11). Die Stoffänderung während der Messung erklärt auch die Tatsache, daß auch für gleichartige Stoffe die physikalischen Konstanten je nach Stoffzustand nicht unerheblich verschieden sein können.

Die zweite Gruppe der technologisch wichtigen Eigenschaften bedingt an und für sich keine Sonderprüfverfahren. Denn die bei hohen oder tiefen Temperaturen auftretenden vorübergehenden oder bleibenden Festigkeitsänderungen lassen sich grundsätzlich mit den im Abschnitt 3 „Mechanische Prüfungen“ angegebenen Verfahren ermitteln. Dazu wäre nur notwendig, entweder vor und nach verschieden langer thermischer Beanspruchung bei verschiedenen Temperaturen festzustellen, welche bleibenden Änderungen der Stoff erfahren hat (durch Bestimmung der Festigkeiten bei Raumtemperatur), oder aber die Festigkeiten nach den im Abschnitt 3 angegebenen Verfahren bei hohen oder niedrigen Temperaturen zu ermitteln.

Erfahrungsgemäß ist diese Art der Prüfmethode meist umständlich und häufig auch zeitraubend, so daß statt dessen im Lauf der Zeit eine Reihe leicht auszuführender Sonderprüfungen sich entwickelt hat.

## b) Physikalische Konstanten.

### Wärmedehnzahl

(linearer thermischer Ausdehnungskoeffizient).

Wenn die Ausdehnung eines festen Körpers nach allen Richtungen gleichmäßig und der Temperaturänderung proportional ist, ist die

<sup>1</sup> Vgl. u. a. KOHLRAUSCH: Lehrbuch der praktischen Physik. Leipzig: B. G. Teubner.

Wärmedehnzahl oder der lineare Ausdehnungskoeffizient die Veränderung seiner Längen je Einheit bei der Temperaturerhöhung um  $1^\circ$ . Die Wärmedehnzahl ist bei größeren Unterschieden der Temperatur nicht mehr konstant. Es ist deshalb bei der Messung der Temperaturbereich, in dem die Ausdehnung ermittelt wurde, anzugeben. Zahlreiche organische Isolierstoffe, die bei erhöhter Temperatur eine chemische oder physikalische Veränderung erleiden, ergeben irreversible Wärmedehnzahlen, und

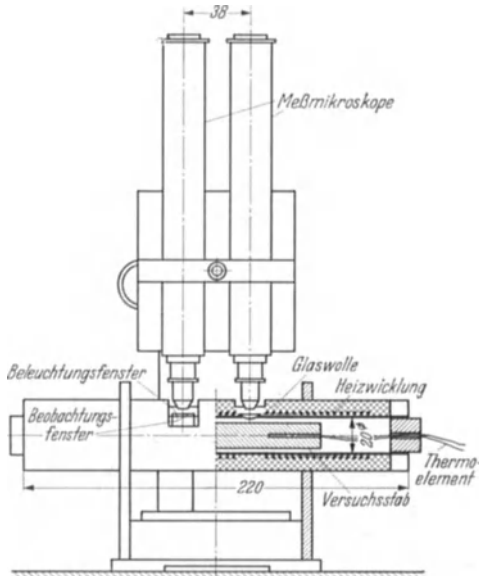


Abb. 154. Mikroskopische Beobachtungseinrichtung zur Bestimmung der Wärmedehnzahl.

Probe nicht unzulässig verzogen hat, ist ein optischer Ausdehnungsmesser zweckmäßiger<sup>1</sup>. Durch zwei Meßmikroskope (s. Abb. 154) werden die auf einem Normalstab aufgebrauchten Marken beobachtet. Der Stab liegt in einem Kupferrohr, auf dem die einlagige Heizwicklung elektrisch isoliert aufgewickelt ist. Außerdem ist für die thermische Isolation eine Lage Glaswolle außen aufgebracht. Die Temperaturmessung erfolgt mit einem Thermoelement in der Längsachse des Stabinneren. Der Stab selbst liegt frei in dem Heizrohr auf zwei seiner Längskanten auf. Die Marken werden entweder mit einer Rasierklinge eingeschlagen, oder es werden zwei weiße Wasserfarbentropfen auf der Probe aufgebracht und in 38 mm Entfernung voneinander zwei Striche mit der Klinge in die Farbe gedrückt. Die so hergestellten Marken sind mit dem bloßen Auge kaum zu erkennen und bewirken keine Verletzung der Preßhaut.

<sup>1</sup> GAST, TH. u. H. KLINGELHÖFFER: Kunststoffe Bd. 28 (1938) S. 9. — ELERT, H.: Phys. Z. Bd. 36 (1935) S. 258.

zwar nimmt im allgemeinen die Wärmedehnzahl ab. Die Messung erfolgt durch Vergleich mit einem Glas- oder Quarzstab mit bekannter Wärmedehnzahl; zwei Versuchsstäbe werden in einen Thermostaten oder in Temperaturbäder eingebracht. Die Ausdehnungsmessung kann entweder durch Hebelübertragung und Spiegelablesung oder durch Benutzung einer Meßuhr vorgenommen werden. In letzterem Falle kann der Druck der Meßuhr unter ungünstigen Umständen zu Fehlmessungen führen. Um jeden Druck auf den Prüfling zu vermeiden und andererseits zu beurteilen, ob sich die

### Wärmeleitfähigkeit.

Die Wärmeleitfähigkeit bzw. Wärmeleitzahl ist die Wärmemenge in cal, die in der Zeiteinheit durch den Querschnitt  $1 \text{ cm}^2$  hindurchfließt, wenn senkrecht zu diesem Querschnitt der Temperaturgradient 1 herrscht, d. h. wenn auf der Strecke 1 cm die Temperaturänderung  $1^\circ$  beträgt. Das Wärmeleitvermögen wird mithin in  $\text{cal cm}^{-1} \text{ Grad}^{-1} \text{ s}^{-1}$  angegeben bzw. entsprechend den Maßeinheiten der Technik im technischen Maßsystem in  $\text{kcal m}^{-1} \text{ Grad}^{-1} \text{ h}^{-1}$ . Zwischen der physikalischen und technischen Einheit besteht folgende Beziehung:  $360 \text{ cal cm}^{-1} \text{ Grad}^{-1} \text{ s}^{-1} = 1 \text{ kcal m}^{-1} \text{ Grad}^{-1} \text{ h}^{-1}$ . Das Wärmeleitvermögen von Isolierstoffen kann durch Vergleich mit der Wärmeleitfähigkeit eines bekannten Stoffes in der nachstehend beschriebenen Versuchseinrichtung ermittelt werden.

Die Wärme strömt von einem Aluminiumzylinder *a* (s. Abb. 155), in dessen oberes Ende Kanäle für eine Heizflüssigkeit eingefräst sind, nacheinander durch eine 10 mm dicke Kupferplatte *b*, die Versuchsplatte *c*, eine 2,5 mm dicke Kupferplatte *d*, die Vergleichsplatte *e* und eine 10 mm dicke Kupferplatte *f* zu dem Aluminiumzylinder *g*, von dem sie durch Kühlwasser abgeführt wird.

Es ist wichtig, daß zwischen den möglichst ebenen und glatten Vergleichsplatten bzw. Versuchsplatten und den Kupferplatten kein Temperatursprung auftritt. Um dies zu verhindern, wird die gesamte Versuchseinrichtung mittels der Säulen *h*, der Brücke *i*, Spindel *k*, Handrad *l* und Druckstück *m* zusammengepreßt. Zwischen die Vergleichs- bzw. Versuchsplatten und die Kupferplatten bringt man ferner einige Tropfen Öl und schiebt reibend und drehend die Platten so fest

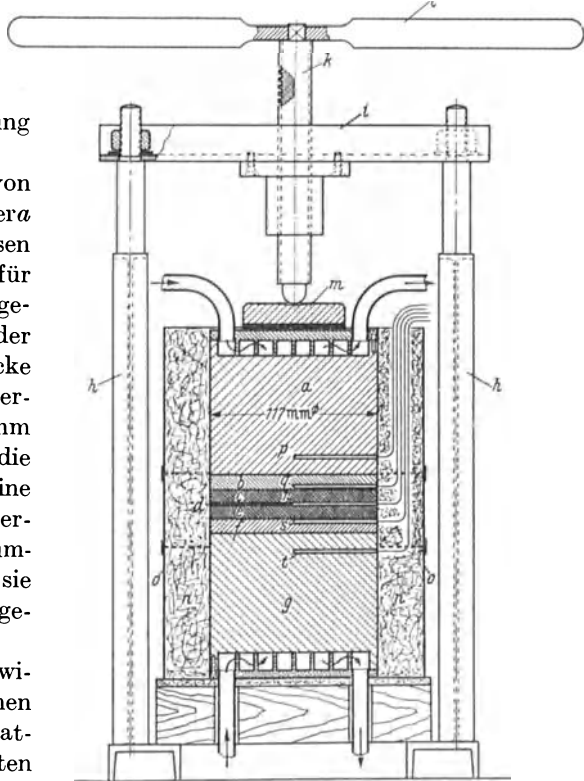


Abb. 155. Anordnung zur Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit.

aufeinander, daß keine den Wärmeübergang hindernden Luftschichten zwischen den Platten bleiben.

Die Versuchseinrichtung ist mit einem Wärmeschutz  $n$  (Packwatte, Glaswolle oder dgl.) umgeben, der durch einen Blechmantel  $o$  zusammengehalten wird.  $p, q, r, s, t$  sind Bohrungen für Thermoelemente. Die in  $q, r, s$  gemessenen Temperaturen können mit Rücksicht auf die gute Wärmeleitfähigkeit des Kupfers gleich den Oberflächentemperaturen der Versuchs- und Vergleichsplatte gesetzt werden. Als Thermoelemente werden 0,2 mm dicke Eisen- und 0,25 mm dicke Konstantandrähte verwendet, deren Thermokräfte mit Hilfe eines Kompensators nach LINDECK-ROTHE gemessen werden.

Die Temperaturen in dem Heiz- und Kühlkörper werden durch Thermostaten<sup>1</sup> konstant gehalten. Die Wärmeleitfähigkeit der Vergleichsplatte muß bekannt sein<sup>2</sup>. Bezeichnet man mit  $\lambda$  die Wärmeleitfähigkeit (in kcal · m<sup>-1</sup> · h<sup>-1</sup> · Grad<sup>-1</sup>), mit  $d$  die Dicke (in m), mit  $F$  die Fläche (in m<sup>2</sup>) der zu messenden Platte und mit  $\Delta t$  den Temperaturunterschied der zu untersuchenden Platte zwischen ihren beiden ebenen Endflächen, sowie die entsprechenden Eigenschaften der Vergleichsplatte mit den gleichen Buchstaben und einem Index  $g$ , so ergibt sich die Wärmeleitfähigkeit nach der Gleichung

$$\lambda = \lambda_g \frac{\Delta t_g}{\Delta t} \cdot \frac{d}{d_g} \cdot \frac{F_g}{F}$$

Die Berichtigungen, die man an dieser Gleichung für den Temperaturabfall in den Ölschichten und für die seitlichen Wärmeverluste anbringen muß, sind abhängig von dem Verhältnis  $\lambda/d$ . Wenn  $\lambda/d$  größer als 500 ist, betragen die gesamten Berichtigungen nur einige Prozent, können also für technische Untersuchungen häufig vernachlässigt werden<sup>3</sup>. Ähnlich wie das hier angegebene Verfahren von ERK, KELLER und POLTZ arbeitet das Verfahren von BATSCH und MEISSNER<sup>4</sup> im stationären Zustand, d. h. diesem Verfahren haftet als Nachteil eine verhältnismäßig lange Meßdauer an, die durch die Zeit bis zur Erreichung des thermischen Gleichgewichtes gegeben ist. Ein Meßverfahren auf Grund nichtstationärer Zustände wurde von R. VIEWEG<sup>5</sup> für Kunststoffe gegeben. Bei diesem nichtstationären Verfahren bestimmt man die Zeit, die benötigt wird,

<sup>1</sup> Zum Beispiel durch die von Gebr. Haake, Medingen bei Dresden, hergestellten „Ultharthermostaten nach HÖPPLER“. Gegebenenfalls kann der Kühlthermostat auch durch die Wasserleitung ersetzt werden.

<sup>2</sup> Die Wärmeleitfähigkeit des Borkronglases 23890 von Schott u. Gen., Jena beträgt bei

20	30	40	50	60	70	80	90	100°	
0,928	0,946	0,959	0,968	0,974	0,978	0,982	0,986	0,989	$\frac{\text{kcal}}{\text{m} \cdot \text{h} \cdot \text{Grad}}$

<sup>3</sup> Genaue Beschreibung der Versuchseinrichtung und der Berechnung der Korrekturen vgl. S. ERK, A. KELLER u. H. POLTZ: Phys. Z. Bd. 38 (1937) S. 394.

<sup>4</sup> Z. techn. Phys. Bd. 17 (1936) S. 283.

<sup>5</sup> VIEWEG, R.: Kunststoffe Bd. 27 (1937) S. 213.



bis die eine Fläche einer Versuchsplatte eine bestimmte Temperatur, z. B. 50°, erreicht hat, wenn die andere Fläche plötzlich auf 100° erwärmt wird. Man ermittelt also die Temperaturleitfähigkeit und errechnet daraus die Wärmeleitfähigkeit nach folgender Gleichung:

$$\lambda = g \cdot c \cdot a.$$

Darin bedeuten  $g$  das spezifische Gewicht,  $c$  die spezifische Wärme und  $a$  die Temperaturleitfähigkeit. Die Temperaturleitfähigkeit ist gegeben durch

$$a = k \frac{d^n}{t}.$$

Hierin bedeutet  $k$  eine durch Versuche zu bestimmende Konstante,  $d$  die Dicke der Versuchsplatte,  $n$  eine aus Messungen mit verschiedenen dicken Platten des gleichen Stoffes ermittelte Zahl (ungefähr = 2) und  $t$  die gemessene Zeit. Das Ergebnis nach diesem Verfahren ist mit den Fehlern bei der Bestimmung des spezifischen Gewichtes, der spezifischen Wärme und der Temperaturleitfähigkeit belastet und liefert daher nur einen Anhaltspunkt.

### Spezifische Wärme.

Die spezifische Wärme eines Körpers ist die Wärmemenge oder Anzahl von Kalorien, die notwendig ist, um die Masseneinheit 1 g oder 1 kg, je nach der Definition der Kalorie, um 1° C zu erwärmen. Auch die Wärmekapazität ist, wenn auch nicht in so starkem Maße wie die Wärmedehnzahl, von der Temperatur abhängig. Im allgemeinen mißt man die spezifische Wärme zwischen 100° und Raumtemperatur und bezeichnet diese als mittlere spezifische Wärme zwischen den genannten Temperaturen. Die spezifische Wärme wird bei konstantem Druck gemessen, d. h. während der Temperaturänderung erfährt der Körper zugleich die seiner Erwärmung entsprechende natürliche Ausdehnung.

Tabelle 21.

Stoff	Spezifische Wärme cal/g °C	Bereich
Phenol-Reinharz . . .	0,330	zwischen 20 und 100° C
Typ S 40% Phenolharz	0,346	
Typ S 50% Phenolharz	0,352	
Typ S Harzgehalt unbekannt . . . . .	0,375	
Typ 12 35% Phenolharz	0,290	zwischen 20 und 65° C
Hartpapier . . . . .	0,360	
Typ 8 . . . . .	0,270	

Für die Ermittlung der spezifischen Wärme fester Körper findet folgendes Verfahren Anwendung. Der zu untersuchende Stoff wird gewogen ( $xg$ ), auf eine gemessene Temperatur  $\vartheta_1$  gebracht und mit einer gewogenen Wassermenge ( $yg$ ) von der Temperatur  $\vartheta_2$  gemischt. Die Endtemperatur des Meßgefäßes mit Wasser und des Körpers sei  $\vartheta$ . Die mittlere spezifische Wärme ergibt sich dann zu

$$c = \frac{y \cdot (\vartheta - \vartheta_2)}{x \cdot (\vartheta_1 - \vartheta)}.$$

Da die Tauchung der Isolierstoffe in Wasser nur verhältnismäßig kurze Zeit geschieht und die Mehrzahl der Isolierstoffe als wasserfest anzusehen sind, ist die Verwendung von Wasser unbedenklich. Gegebenenfalls können auch andere Flüssigkeiten mit bekannter spezifischer Wärme für das Mischungsverfahren benutzt werden. Auch das Dampfkalorimeter hat für die Bestimmung der spezifischen Wärme Anwendung gefunden<sup>1</sup>. Die spezifischen Wärmen einiger Isolierstoffe sind in der Tabelle 21 angegeben.

### c) Technologische Prüfungen.

#### α) Kurzfristige Prüfungen.

**1. Verhalten bei Erwärmen ohne zusätzliche mechanische Beanspruchungen.** In den Isolierstoffvorschriften für Hartpapier und Hartgewebe VDE 0318 ist ein Verfahren angegeben, das in einfacher Weise die **Wärmebeständigkeit** zu erfassen sucht.

Bei der Wärmeprüfung von Hartpapier und Hartgewebe müssen die Schichtung, die Möglichkeit der Wasseraufnahme und die Eigenart des Kunstharzes besonders weitgehend berücksichtigt werden. Die Wärmebeständigkeit fast aller Hartpapiersorten ist im allgemeinen durchaus genügend, da Hartpapier und Hartgewebe unter Öl dauernd wenigstens 110° Wärme, vorübergehend 150° Wärme und darüber meist ohne weiteres ertragen und Temperaturen von wesentlich über 100° selten vorkommen. Wirft man jedoch z. B. ein Stück Hartpapier ohne Vorbehandlung in ein Ölbad von über 100°, so wird sich häufig eine Blasenbildung oder Spalten des Hartpapieres ergeben. Bringt man aber ein Stück derselben Hartpapiersorte in Luft oder Öl von 40 bis 60° und steigert die Temperatur allmählich auf weit über 100°, so wird das Versuchsstück nur in den seltensten Fällen eine Veränderung zeigen. Dieses erklärt sich aus folgendem:

Im Hartpapier vorhandene Feuchtigkeit sowie gewisse andere, besonders in ungenügend ausgehärtetem Kunstharz vorhandene Bestandteile verdampfen bzw. vergasen bei entsprechend hohen Temperaturen.

Bringt man das Versuchsstück plötzlich in ein Ölbad von wesentlich über 100°, so kann der Gasdruck so schnell ansteigen, daß die Gase die Schichten auseinandersprengen.

Eine Wärmeprüfung mit langsamer Temperatursteigerung im Ölbad gibt keinen einwandfreien Anhalt über die Güte des zu prüfenden Hartpapieres; außerdem kann die Wärmebehandlung in heißem Öl mit allmählich ansteigender Temperatur die elektrischen Eigenschaften unter Umständen sehr erheblich verbessern.

Es ist daher ein Mittelweg für die Wärmeprüfung vorgesehen mit Wärmegraden und Versuchszeiten, die erfahrungsgemäß einen durchaus

<sup>1</sup> VIEWEG, R.: Kunststoffe Bd. 27 (1937) S. 213.

genügenden Anhalt für die Güte ergeben und andererseits in den in der Praxis zur Verfügung stehenden Zeiten durchgeführt werden können.

Nach VDE 0318, § 21, werden die Prüfkörper (aus Platten herausgeschnittene Stäbe,  $120 \times 15 \times$  Plattendicke oder mindestens 50 mm lange Stab- oder Rohrabschnitte oder ganze Formstücke) — nach 4stündigem Trocknen bei  $70^\circ$  — 4 h lang in Öl bei  $130^\circ$  gelagert (Proben aus Hartpapierplatten, Klasse III und IV, 10 min bei  $150^\circ$ ). Verlangt wird, daß die Prüfkörper nach der Wärmebehandlung weder Blasen noch Risse noch erhebliche Formänderungen aufweisen.

Befreit man ein Versuchsstück, das einer Wärmeprüfung in Öl ausgesetzt wurde, durch Abtrocknen von dem äußerlich anhaftenden Öl und setzt es nachträglich einem Druck senkrecht zu den Schichten, z. B. durch Einspannen in einen Schraubstock, aus, so werden vielfach Öltröpfchen aus feinen Rissen der Schnittflächen austreten. Derartige Risse gelten nicht als unzulässige „sichtbare Risse“ im Sinne der Leitsätze.

Der Versuch nach VDE läßt zwar grobe Fehler erkennen, ist jedoch nicht geeignet, Aussagen über die tatsächliche Wärmebeständigkeit — vor allem bei langfristiger Wärmewirkung oder gleichzeitiger mechanischer Beanspruchung — zu machen.

**2. Verhalten bei Erwärmen unter gleichzeitiger mechanischer Beanspruchung.** Viele Isolierteile werden im Betriebe nicht nur Temperaturen ausgesetzt, die weit über Zimmertemperatur liegen können, sondern zugleich auch mechanischen Beanspruchungen. Der Isolierstoff muß also genügende „Wärmefestigkeit“ besitzen, soll die Anlage betriebssicher arbeiten. Um zu beurteilen, ob ein Isolierstoff auch bei höheren Temperaturen ausreichende Festigkeit hat, eignen sich viele Versuchsausführungen und -einrichtungen. Am einfachsten und zweckmäßigsten haben sich die Verfahren nach MARTENS (Biegeversuch) und nach VICAT (Eindruckversuch) erwiesen, die beide in den deutschen Vorschriften VDE 0302 aufgenommen sind.

Bei dem Verfahren nach MARTENS wird als Prüfkörper ein Stab verwendet, der auf *Biegung* beansprucht (vgl. Abb. 156a bis c und 157) und dabei gleichmäßig so hoch erhitzt wird, bis eine bestimmte Verformung (Durchbiegung) des Stabes erzielt wird. Die hierbei gemessene Temperatur ist das Maß für die Wärmefestigkeit.

Bei dem Verfahren nach VICAT wird ein Zylinder in die Oberfläche des Isolierstoffes mit bestimmter Last unter gleichzeitiger gleichmäßiger Temperatursteigerung gedrückt, wobei die Eindringtiefe gemessen wird. Hierbei wird also der Isolierstoff auf *Druck* und *Scherung* beansprucht (Abb. 162, S. 242).

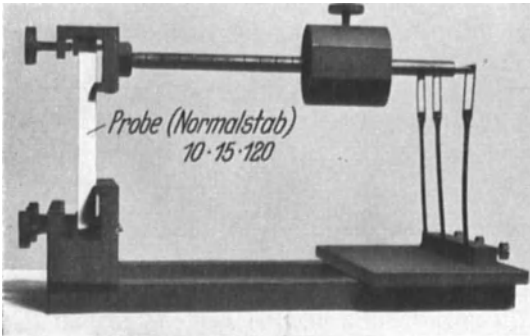
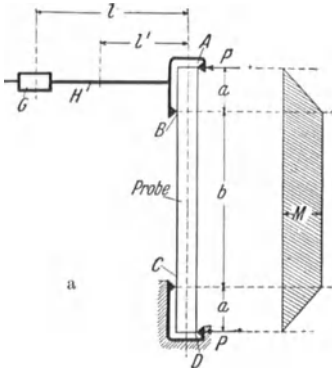
Beide Verfahren nach MARTENS oder VICAT geben also *die* Temperatur an, bei der ein Körper unter mechanischer Beanspruchung sich um ein bestimmtes Maß verformt.

## a) Biegeversuch

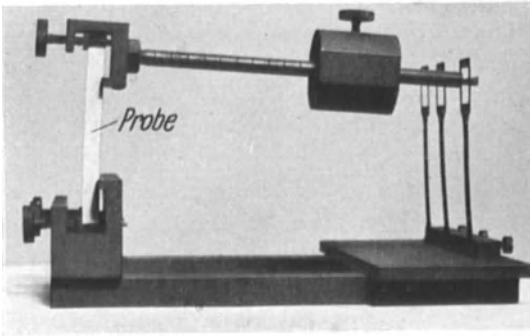
(Wärmefestigkeit nach MARTENS und ausländische Verfahren).

Die schematische Abb. 156a stellt die Beanspruchung des Probestabes bei dem in Deutschland üblichen Martensschen 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 Abstände  $a$

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 der ganzen 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  $M = G \cdot l = P \cdot a$ . 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 Moments  $G \cdot l$  bedingt. Die Abmessungen des Normalstabes und des Normal-



b



c

Abb. 156a bis c. Anordnung bei der Prüfung auf Wärmefestigkeit nach MARTENS. a Skizze der Anordnung und Spannungsverteilung, b Probe vor, c nach dem Versuch.

apparates 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 Stab 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  $M = G \cdot l + H \cdot l' = P \cdot a$ .

Die Prüfung ist sehr scharf, denn die Ergebnisse liegen allgemein bei Isolierstoffen meistens nicht unerheblich unter denjenigen Temperaturen, die im Gebrauch des Fertigstückes, ohne Schaden zu verursachen, auftreten können. Dieser Abstand gegenüber der Gebrauchstemperatur ist besonders groß bei Hartgummi; bei verschiedenen Hartgummimischungen gibt die Prüfung jedoch keine genügende Differenzierung.

### Deutsche Vorschriften.

#### 1. Allgemeine Vorschriften für Isolierstoffe (VDE 0302.)

Wärmefestigkeit nach MARTENS. Die in senkrechter Lage von der Grundplatte  $g$  (s. Abb. 157) festgehaltenen Normalstäbe ( $120 \times 15 \times 10 \text{ mm}^3$ ) werden durch angehängte Gewichtshebel  $h$  mit der konstanten

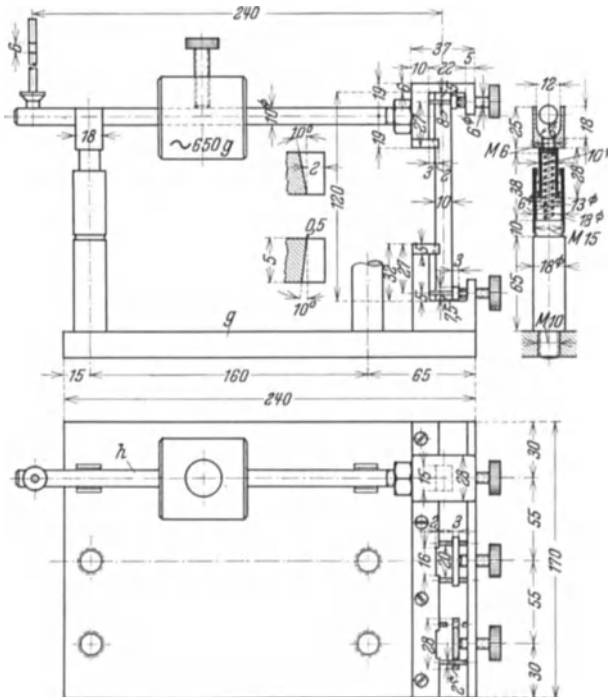


Abb. 157. Gerät zur Prüfung auf Wärmefestigkeit nach MARTENS, VDE 0302.

Biegespannung von  $50 \text{ kg/cm}^2$  belastet und langsam erwärmt. Die Geschwindigkeit der Temperatursteigerung soll  $50^\circ$  in 1 h betragen. Maßstab für die Wärmefestigkeit nach MARTENS ist die Temperatur, bei der der Hebel  $h$  um 6 mm auf 240 mm Länge absinkt bzw. die Probe bricht.

### 2. Sondervorschrift für Hartgummi (VDE 0322).

Die Versuchsausführung unterscheidet sich von der normalen durch die Vorschrift anderer Prüfstäbe ( $5 \times 5 \times 60 \text{ mm}^3$ ) und die dadurch bedingte Anwendung eines anderen Prüfgerätes nach Abb. 158 a und b.

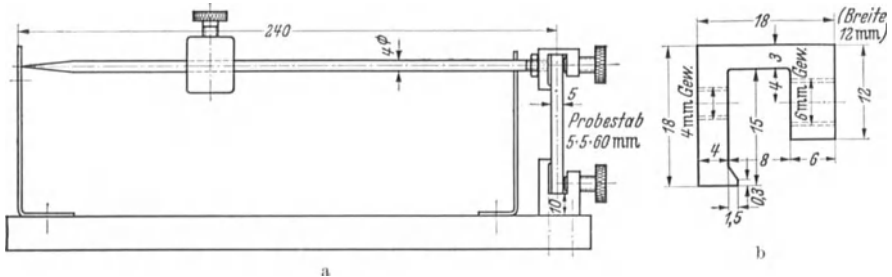


Abb. 158 a und b. Gerät zur Prüfung von Hartgummi auf Wärmefestigkeit nach MARTENS am Kleinstab. a Gerät, b Einspannung. (Nach VDE 0322.)

### Britische Vorschriften.

Die *Formänderung in der Wärme* („plastic yield“) wird für *Kunstharz-Preßstoffe* aus Phenolharzen (nach B.S.S. Nr. 771—1938 an  $15 \times 15 \times 200 \text{ mm}^3$  großen Stäben gemessen, die — einseitig 45 mm tief horizontal eingespannt — bei der in Tabelle 22 angegebenen Temperatur unter Biegespannung (Biegemoment:  $470 \text{ g} \times 150 \text{ mm}$ ) 6 h gelagert werden; dabei darf das Stabende höchstens 5 mm abgesunken sein.

Tabelle 22.

Phenolharz-Preßstoff	Zulässige Formänderung in der Wärme für Phenolharz-Preßstoffe nach den Britischen Normen B.S.S. Nr. 771—1938	
	höchstens mm	bei ° C
G (allgemeiner Typ) . . . . .	5	100
GX (verbessertes Typ) . . . . .		140
MS (mittelschlagfester Typ) . . . . .		100
HS (hochschlagfester Typ) . . . . .		100
HR (wärmefester Typ) . . . . .		180

### Amerikanische Vorschriften.

Für *Isolierpreßstoffe* ist die Bestimmung der Wärmefestigkeit (Durchbiegung in der Wärme, distortion under heat) in A.S.T.M. D 48—33, 18/21 festgelegt.

Als Probe wird ein gepreßter Stab wie zur Prüfung auf Biegefestigkeit,  $12,7 \times 12,7 \times 127 \text{ mm}^3$ , benutzt.

Zur Prüfung dient das Gerät nach Abb. 159. Die Probe wird auf 2 Auflager (Abstand 102 mm) gelegt und wie bei der Biegefestigkeits-

prüfung belastet, jedoch mit konstantem Gewicht von 2,5 kg. Die Probe befindet sich beim Versuch in einem Luftbad, das mittels Ölbad gleichmäßig beheizt werden kann. Geprüft werden 3 Proben, die — angefangen bei rd. 20° C — gleichmäßig unter Last so weit erwärmt werden (0,5° C/min), bis eine Durchbiegung von 0,254 mm erreicht ist. Zur Beobachtung der Durchbiegung dient eine Meßuhr (Mikrometer); empfohlen wird automatische Abschaltung der Heizquelle und Alarmsignal beim Erreichen der vorgeschriebenen Durchbiegung von 0,254 mm.

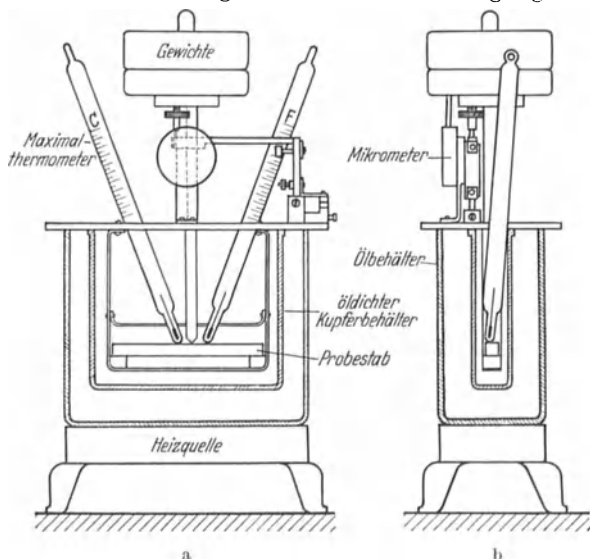


Abb. 159 a und b. Gerät zur Prüfung auf Wärmefestigkeit nach A.S.T.M. D 48—30.

Anzugeben sind: Querschnittsmaße der Probenmitte, Temperatur in °C, bei der die Durchbiegung von 0,254 mm erreicht wird, Versuchsdauer, auffällige Materialerscheinungen bei und nach dem Versuch.

#### Französische Vorschriften.

An *Isolierpreßstoffen* wird die Wärmefestigkeit („tenue à la chaleur“) folgendermaßen bestimmt (U.S.E. 1937/38—46, S. 1009).

Als Probe dient ein Stab, 15 × 15 × 200 mm<sup>3</sup>.

Fünf Stäbe werden frühestens 24 h nach dem Pressen ohne weitere Vorbehandlung in der Anordnung nach Abb. 160 — also wie beim Biegeversuch der französischen Vorschriften —, mit gleichbleibender Last von 2,5 kg gleichmäßig erwärmt (2° C/min), bis 0,25 mm Durchbiegung des Stabes erreicht ist. Die in diesem Zeitpunkt abgelesene Temperatur ist das Maß für die Wärmefestigkeit.

Zum Erwärmen dient ein 55 × 160 × 240 mm<sup>3</sup> großer Metallkasten, der mittels Ölbad beheizt wird. Die Durchbiegung von 0,25 mm

gilt nur für Stäbe mit genau  $15 \times 15 \text{ mm}^2$  Querschnitt und genau 150 mm Auflagerentfernung. Bei Abweichungen von diesen Maßen ist die korrigierte Durchbiegung  $f$  zugrunde zu legen.  $f$  wird berechnet nach

$$f = 0,25 \cdot \frac{15 D^3}{1000 b \cdot h^3},$$

wobei  $D$  Auflagerentfernung in mm,  $b$  Breite,  $h$  Höhe des Stabes in mm ist. Angegeben wird die höchste und niedrigste Temperatur, bei der 0,25 mm ( $\pm$  Korrektur) Durchbiegung erreicht wird, sowie das Temperaturmittel aus den drei übrigen Versuchen.

Früher wurde außerdem zur Charakteristik des Verhaltens bei der Wärmeprüfung die Darstellung der Durchbiegung und der zugehörigen Temperatur in Abhängigkeit von der Versuchsdauer verlangt (vgl. Abb. 161).

Zum Vergleich der deutschen und ausländischen Vorschriften sind in Tabelle 23 die wichtigsten Einzelheiten der Versuchsausführung zusammengestellt. Die französischen Vorschriften sind dabei nicht berücksichtigt worden, da sie im Prinzip den A.S.T.M.-Normen ähneln. Den Verfahren ist gemeinsam, daß als Maßstab für die Einteilung der Isolierstoffe auf Grund ihres Verhaltens in der Wärme diejenige Temperatur gewählt wird, bei welcher bei Biegebeanspruchung eine bestimmte Verformung auftritt. In den Einzelheiten weichen die Verfahren erheblich von einander ab. Das deutsche Verfahren nach MARTENS ist wiederholt kritisiert worden. Nach Ausführungen von OWENS<sup>1</sup> wird bei dem deutschen Verfahren bemängelt, daß der Zeitfaktor unberücksichtigt bleibe und daher die

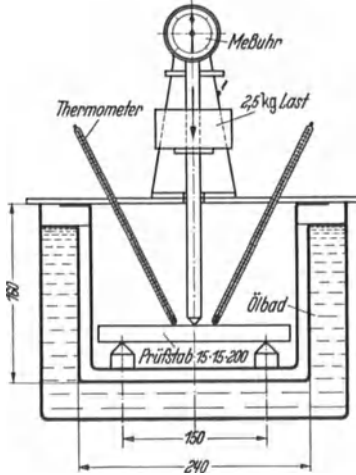


Abb. 160. Gerät zur Prüfung auf Wärmebeständigkeit nach den französischen Vorschriften. U.S.E. 1937/38.

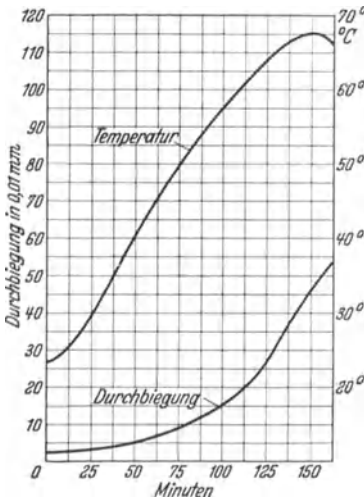


Abb. 161. Darstellung der Versuchsergebnisse bei der Prüfung auf Wärmebeständigkeit nach den früheren französischen Vorschriften. (Aus SOMMERFELD: Plastische Massen.)

Verwertung der Ergebnisse für die Praxis nicht möglich sei. Die Werte nach MARTENS lägen meist höher als nach der britischen Norm.

<sup>1</sup> OWENS: The Classification of Industrial Plastics. Brit. Plastics Bd. 7 (1936) S. 552.



Tabelle 23.

Land	Verfahren	Probenform (mm)	Belastungsart	Temperaturbedingungen	Messung
England	B.S.S. Nr. 488 und Nr. 771	15 × 15 × 200	Einseitige Einspannung des waagerechten Stabes, 450 g Last (5 mm vom freien Ende, 150 mm von der Einspannung)	6 h konstant	Nach B.S.S. Nr. 488: Temperatur <sup>1</sup> , bei der nach 6 h 5 mm Absinken des Stabendes erreicht wird (Messung nach B.S.S. Nr. 771, s. S. 238)
Deutschland	VDE 0302	10 × 15 × 120	Senkrechter Stab unter Biegespannung von 50 kg/cm <sup>2</sup>	Temperaturanstieg 50° C/h	Temperatur, bei der der Belastungshebel um 6 mm abgesunken ist
Ver. Staaten	A.S.T.M. D 48—33	12,7 × 12,7 × 127	Waagerechter Stab auf zwei Stützen mit 102 mm Abstand 2,5 kg Last in Probenmitte	Temperaturanstieg 0,5° C/min	Temperatur, bei der 0,254 mm Durchbiegung erreicht ist

Der gleiche Mangel, nämlich die Vernachlässigung des Zeitfaktors, ist aber auch bei den amerikanischen Vorschriften zu verzeichnen. Demgegenüber hat das britische Verfahren den schweren Nachteil, daß bei der gewählten Beanspruchung das höchste Biegemoment unmittelbar an der Einspannung liegt, so daß sich zufällige Fehler im Gefüge an dieser Stelle nachteilig auswirken. Außerdem ist die Versuchsausführung für praktische Bedürfnisse zu langwierig. Bei einer Neugestaltung der Prüfverfahren könnte ohne Schwierigkeiten bei Beibehaltung der Prüfung nach MARTENS auch der Zeitfaktor genügend berücksichtigt werden durch entsprechenden Ausbau des Verfahrens.

### b) Druckversuch.

Eine der einfachsten Prüfungen auf Wärmefestigkeit unter gleichzeitiger Druckbeanspruchung ist bisher für *Glimmer*-Erzeugnisse und zwar für Kommutator-Mikanit in VDE 0332 vorgesehen. Bei einem Druck von 200 kg/cm<sup>2</sup> sind einzelne Lamellen auf 160° zu erwärmen; festzustellen ist, ob dabei Bindemittelaustritt stattfindet. Einzelheiten des Versuches sind nicht festgelegt.

<sup>1</sup> Die Temperatur wird durch Interpolation der Temperatur-Formänderungskurve ermittelt.

## c) Eindruckversuch

(Wärmefestigkeit nach VICAT und Schweizer Verfahren).

Aus dem Bedürfnis der Hartgummi-Industrie heraus ist die sog. Vicat-Nadel in die Isolierprüfung eingeführt worden; in der Ausführungsform weicht dieses Prüfverfahren indessen wesentlich von der ursprünglichen Vicat-Prüfung der Zementnormenprüfung ab. Die Belastung der Nadel ist sehr viel höher, nämlich 5 kg (entsprechend 500 kg/cm<sup>2</sup>), und die Messung der Eindringtiefe muß mit größerer Genauigkeit erfolgen.

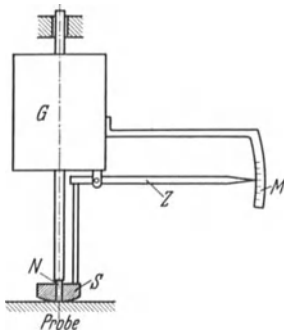


Abb. 162. Anordnung bei der Prüfung auf Wärmefestigkeit nach VICAT. (Aus MEMMLER: Handbuch der Kautschukwissenschaft S. 707. 1930.)

Abb. 162 zeigt das Prinzip des Apparates, dem von A. SCHOB eine zweckmäßige Ausführungsform gegeben worden ist. Die unten eben abgeschliffene Nadel *N* von 1,13 mm Dmr. (= 1 mm<sup>2</sup> Querschnitt) ist durch das 5 kg schwere Gewicht *G* belastet; das schwach ballige Aufsatzstück *S* ruht auf der Probenoberfläche. Die Relativbewegung der Nadel *N* gegen das Aufsatzstück *S* wird durch den Zeiger *Z* 15fach vergrößert an dem Maßstab *M* angezeigt. Als *Wärmefestigkeit nach VICAT* gilt die Temperatur, bei der die Nadel 1 mm tief in die Probe eingedrungen ist; die Temperatursteigerung entspricht derjenigen der Martens-Prüfung.

Obwohl das Verfahren in den deutschen Vorschriften VDE 0302 seit über einem Jahrzehnt aufgeführt ist, hat es erst vor wenigen Jahren größere Bedeutung erlangt bei Anwendung auf beliebig gestaltete Fertigteile im Rahmen der Preßstoff-Überwachung nach Änderung der Versuchsbedingungen. Es gibt für die Festlegung des Maßstabes der Wärmefestigkeit mittels der Vicat-Nadel die zwei Möglichkeiten:

1. Festlegung einer bestimmten, für alle Preßstoffe gleichen Eindringtiefe und dann Ermittlung derjenigen Temperaturen, bei denen sich diese Eindringtiefe bei den verschiedenen Materialien ergibt.

2. Festlegung bestimmter Prüftemperaturen für die verschiedenen Preßstoff-Typen (z. B. 75, 100, 150° C usw.), bei denen eine bestimmte für alle Typen gleiche Eindringtiefe nicht überschritten werden darf.

Die VDE-Vorschriften sehen als maßgebliche Eindringtiefe für die Vicat-Nadel 1 mm vor; bei Aufstellung dieser Vorschrift dachte man hauptsächlich an Pechmassen und Hartgummi. An die jetzt im Vordergrund stehenden härtbaren Kunstharze sind höhere Anforderungen zu stellen. Hinsichtlich der Materialcharakterisierung sind  $\frac{1}{10}$  mm am besten; bei so geringer Eindringtiefe ist allerdings sorgfältige Versuchsausführung notwendig, um Fehler zu vermeiden.

Für genauere Werkstoffstudien ist die Versuchsausführung nach 1. geeigneter, für die regelmäßige Fabrikationskontrolle die nach 2. Da die Werkstoffprüfung am Fertigstück in erster Linie der Fabrikationskontrolle dient, hat man sich für Fall 2 entschieden. Als Versuchstemperaturen wurden für die verschiedenen Stofftypen die Temperaturen gewählt, die den jeweiligen Mindest-Martens-Graden entsprechen; z. B. wird Typ K bei 100°, Typ S bei 125°, Typen 11 und 12 bei 150° geprüft. Damit die Oberfläche die Prüftemperatur sicher angenommen hat, ist die Probe vor Aufsetzen der Vicat-Nadel 10 min bei der Prüftemperatur zu lagern. Da bei den härtbaren Stoffen Warmlagerung eine Nachhärtung mit sich bringt, darf die vorgeschriebene Lagerzeit nicht überschritten werden. 10 s nach Aufsetzen der Vicat-Nadel darf die Eindringtiefe im Mittel  $\frac{1}{10}$  mm nicht überschreiten.

Die nur 1 mm<sup>2</sup> große Vicat-Nadel erfaßt immer nur eine sehr kleine Materialmenge, deshalb sind mehr Parallelversuche auszuführen als bei der Martens-Probe; bei Stoffen mit grobkörnigen Bestandteilen verschiedener Härte sind stärkere Schwankungen der Einzelwerte unvermeidlich.

Eine Eindruckprobe (Kugleindruckprobe wäre nicht vorteilhafter) ist bestimmt nicht das Ideal einer Wärmefestigkeitsprobe (weil die wichtige Zugfestigkeit des Stoffes nicht miterfaßt wird); sie ist aber auf jeden Fall besser als gar kein Wärmefestigkeitsversuch, der stets für die praktische Bewertung eines Stoffes wichtig ist.

In dieser Erkenntnis ist auch vom Schweizerischen Verband für die Materialprüfungen der Technik (SVMT), Kommission 19 (Isoliermaterial der Elektrotechnik) ein ähnliches Prüfverfahren vorgeschlagen worden<sup>1</sup>, das im Verein mit der Bestimmung der Entflammungstemperatur (s. S. 245) das Glühdorngerät (s. S. 245) entbehrlich zu machen sucht. Das Verfahren wird bezeichnet:

„Härtegradbestimmung bei höherer Temperatur.“ Die Bestimmung hat den Zweck, bei höherer Temperatur ungenügend formbeständige Isolierstoffe zu erkennen und auszuschneiden. Das zu prüfende Isoliermaterial oder das ganze Gerät wird bei der verlangten Temperatur (z. B. 120 oder 150° C) 24 h gelagert, wobei eine horizontale Fläche des Prüflings mittels 5 mm-Stahlkugel mit 2 kg belastet wird (Abb. 163). Aus dem bleibenden Eindruck nach der Lagerung wird der Härtegrad in kg/cm<sup>2</sup> berechnet.

**3. Verhalten bei hohen Temperaturen.** Zur Beurteilung des Verhaltens von Isolierstoffen bei kurzfristiger Einwirkung hoher Temperaturen, wie

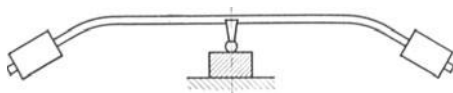


Abb. 163. Anordnung bei der Prüfung auf Wärmefestigkeit nach Schweizer Vorschlägen.

<sup>1</sup> Schweiz. Arch. angew. Wiss. u. Techn. Bd. 4 (1938) S. 109—116.

sie z. B. in Schaltgeräten mittelbar oder unmittelbar durch Schaltfeuer auftreten können, sind eine Reihe von Verfahren im In- und Ausland entwickelt worden, die auf verschiedenen Wegen den praktisch möglichen Verhältnissen nahe zu kommen suchen, aber alle den grundsätzlichen Mangel aufweisen, daß von den möglichen Beanspruchungen *eine* willkürlich herausgegriffen und als Grundlage für ein Prüfverfahren gewählt wurde. Daher ist es unausbleiblich, daß die mit solchen Verfahren

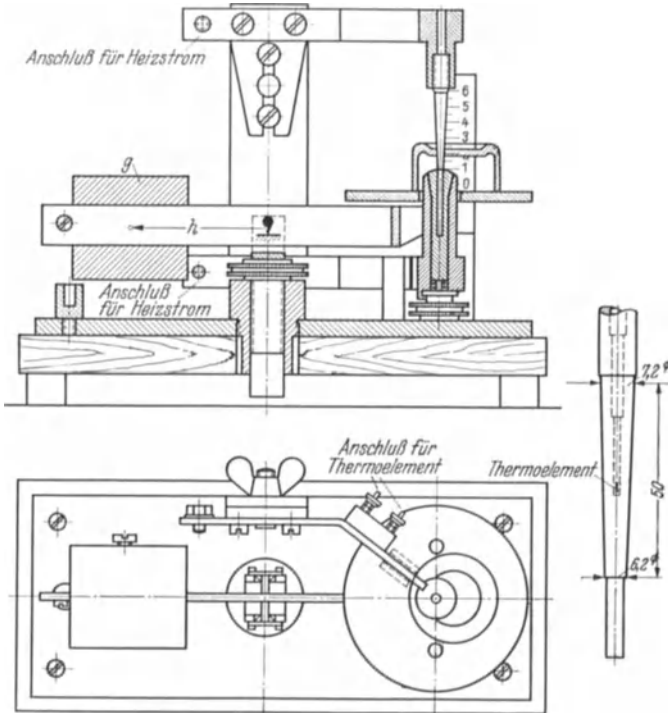


Abb. 164. Schema des Glühornprüfgerätes.

gewonnenen Ergebnisse *allein* ohne Ergänzung durch andersartige thermische Prüfungen häufig zu Fehlbeurteilungen führen (vgl. S. 15—17).

**Flamm- und Brennpunkt.** Bei einer Reihe von Prüfverfahren wird als Kennzeichen für das Verhalten organischer Isolierstoffe die Entzündungstemperatur gewählt, d. h. die Temperatur, bei der die gasförmigen Zersetzungsprodukte des Stoffes entweder a) beim Zünden mittels Zündflamme entzündet werden („*Flammpunkt*“) oder b) sich von selbst entzünden („*Brennpunkt*“). Diese Temperaturen sind in sehr starkem Maße von den jeweiligen Versuchsbedingungen abhängig, so daß bei nicht peinlich genauer Innehaltung der Bedingungen starke Streuungen in den Ergebnissen unvermeidlich sind.

Zu den unter a) genannten Verfahren gehört die Prüfung mittels des *Glühdornprüfgerätes*.

Glühdornprüfgerät. Für die Bestimmung der Erweichbarkeit und der Entzündbarkeit von organischen Isolierstoffen wurde von der „Vereeniging van Directeuren van Electriciteitsbedrijven in Nederland“, der holländischen Prüfstelle (Kema), ein Prüfgerät entwickelt, das an örtlich eng begrenzten Flächen eine Erwärmungsprüfung bei 500 bzw. 300° vorsieht. Das Prüfgerät ist schematisch in der Abb. 164 wiedergegeben. Ein elektrisch heizbarer konischer Dorn von 6,2 mm Dmr. wird in ein konisch aufgetriebenes Loch, das in den zu prüfenden Teil gebohrt wird, so eingesetzt, daß zu beiden Seiten gleich lange Teile des Konus herausragen. Der Prüfling wird durch das Gewicht  $g$  über den Hebelarm  $h$  mit einem Druck von 1200 g auf den Dorn gedrückt. Der Dorn wird in etwa 3 min elektrisch auf 500 bzw. 300° erwärmt und dann 2 min auf dieser Temperatur gehalten. Die Temperaturmessung geschieht mit Hilfe eines in den Dorn eingebauten Thermoelementes. Während der Heizung des Dornes werden mit Hilfe eines Hochfrequenzfunkenerzeugers Entladungen am erwärmten Isolierstoff hervorgerufen, die eine Entzündung etwa entweichender Gase bewirken sollen. Während des Versuches soll sich der Prüfling bei einer Beanspruchung mit 500 bzw. 300° um nicht mehr als 3 mm auf dem Dorn verschieben. Die Untersuchungsergebnisse mit diesem Prüfgerät werden durch die Dicke des Werkstoffes an der Prüfstelle sowie der Form des Glühdornes, der Art der Temperatursteigerung und der im Raum zufällig vorhandenen Luftströmungen beeinflußt. Die Beurteilung der Brenn- oder Entflammbarkeit mit Hilfe des Hochfrequenzfunkenerzeugers ist ebenfalls nicht eindeutig. Das Prüfverfahren besitzt deshalb höchstens noch insofern Bedeutung, als es thermisch völlig ungeeignete Stoffe von einer Verwendung ausschließt.

Von seiten des Schweizerischen Verbandes für die Materialprüfungen der Technik (SVMT), Kommission 19 (Isolierstoffe) ist an Stelle der Anwendung des Glühdornprüfgerätes vorgeschlagen worden, neben einer gesonderten Prüfung auf Erweichbarkeit („Härtegradbestimmung bei höherer Temperatur“, s. S. 243) den *Flammpunkt* zu bestimmen in einer Art, die sich an die bekannte Flammpunktsbestimmung für Öle anlehnt<sup>1</sup>.

Das zu prüfende Isoliermaterial wird feingepulvert (Durchgang durch Sieb mit 50000 Maschen/dm<sup>2</sup>). 1 g des Pulvers wird in den inneren, 36 mm hohen, oben 42 mm weiten Porzellantiegel (Abb. 165) gefüllt und mittels Bunsenflamme (8 cm hoch, innerer Flammenkegel 4 cm hoch) indirekt über den äußeren, 57,5 mm hohen, oben 72,5 mm weiten Porzellantiegel erhitzt (in 2½ min 300° C, gemessen mittels Thermoelementes mit Lötstelle am inneren Tiegelboden). Gemessen wird die

<sup>1</sup> Vgl. z. B. Ölbewirtschaftung, 2. Aufl. Berlin: Julius Springer 1937.

Temperatur, bei der die beim Erhitzen aus dem Prüfzut entweichenden Gase sich an einer 10 mm hohen, feststehenden Zündflamme entzünden.

Zu den unter b) genannten Verfahren („*Brennpunkt*“) ist das in den französischen Vorschriften für *Lackleinen* angegebene Verfahren zur Bestimmung der „Entzündbarkeit“ (U.S.E. 1937/38—52, S. 1062/63) zu rechnen, das auch hinsichtlich der Versuchsanordnung für folien- oder bandförmige Isolierstoffe beachtenswert ist.

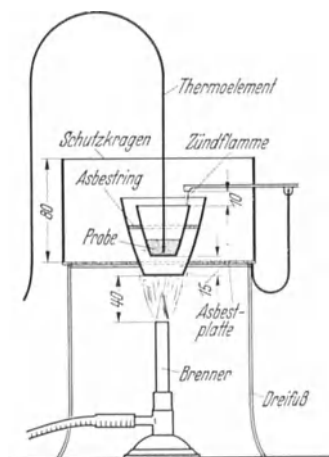


Abb. 165. Gerät zur Bestimmung des „Flammpunktes“ organischer Isolierstoffe nach Schweizer Vorschlag.

Ein diagonal geschnittenes 20 mm breites Band aus Lackleinen wird auf einen Messingstab ( $d = 10$  mm) gewickelt und in der Anordnung nach Abb. 166 mittels Alkohollampe indirekt bis zur Entzündung erhitzt. Gemessen wird die Entzündungstemperatur mittels Thermoelements, das zwischen Band und Stab gelegt wird. Die Alkohollampe soll denaturierten Spiritus ( $D_4^{15} = 0,834$ ) verbrennen bei 15 cm Flammenhöhe. Als Wärmeschutzscheibe wird eine dünne Metallscheibe ( $d = 100$  mm) verwendet.

**Brennbarkeit und Glutfestigkeit.** Eine zweite Gruppe von Prüfverfahren zur Erfassung des Verhaltens organischer Isolierstoffe bei kurzfristiger Einwirkung hoher Temperaturen hat als gemeinsames Kennzeichen, daß der Isolierstoff mit einer Heizquelle von konstanter hoher Temperatur

in Berührung gebracht wird; als Heizquelle dient  
a) eine offene Flamme („*Brennbarkeit*“),  
b) ein glühender Stab („*Glutfestigkeit*“).

Zu den Verfahren nach a) gehörte das früher übliche deutsche Verfahren zur Bestimmung der „*Feuersicherheit*“

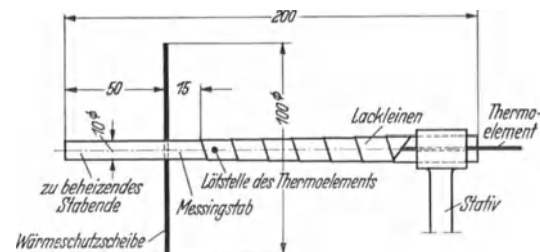


Abb. 166. Versuchsanordnung zur Bestimmung der Entzündbarkeit von Lackleinen nach U.S.E. 1937/38—52.

nach VDE 0302, nach welchem ein  $10 \times 15 \times 120$  mm<sup>3</sup> großer Stab (Normalstab) horizontal der 10 cm hohen Flamme eines schräg (45°) gestellten Leuchtgas-Bunsenbrenners (9 mm Innendurchmesser) 1 min lang ausgesetzt wurde, wobei die Brennerkante 3 cm unter der Stabunterkante und 1 cm neben dem Stabende sein sollte. Maßstab war das Verhalten, nach dem die Isolierstoffe in 3 Stufen eingeteilt wurden:

Stufe 0: Stab brennt nach Entfernen des Brenners länger als  $\frac{1}{4}$  min weiter,

Stufe 1: nicht länger als  $\frac{1}{4}$  min weiter,

Stufe 2: Stab entzündet sich nicht.

Man hat das Verfahren verlassen, da es sich als zu grob erwies, um eine sichere, den praktischen Bedürfnissen angepaßte Stoffunterscheidung zu ermöglichen. Statt dessen wendet man jetzt die Prüfung auf „Glutfestigkeit“ an (s. S. 248). Über die gleichfalls hierher gehörende Prüfung auf *Lichtbogenfestigkeit* s. S. 159.

Ein dem früheren deutschen Verfahren zur Bestimmung der „Feuersicherheit“ ähnliches Verfahren ist heute noch in Frankreich üblich, obwohl es die gleichen grundsätzlichen Mängel wie das frühere deutsche Verfahren aufweist.

Nach den französischen Vorschriften für *Isolier-Preßstoffe* (U.S.E. 1937/38—46, S. 1011) wird die „Brennbarkeit“ (inflammabilité) an Stabproben ( $15 \times 15 \times 200$  mm<sup>3</sup>) bestimmt.

Drei Stäbe werden frühestens 24 h nach dem Pressen ohne weitere Vorbehandlung in die Flamme eines Alkoholbrenners 30 s lang horizontal gehalten.

Die Dochtaustrittsöffnung des Brenners soll 8 mm Dmr. haben; der benutzte Alkohol soll denaturierter Spiritus ( $D_4^{15} = 0,834$ ) sein, die Flammenhöhe rd. 15 cm betragen. Die senkrechte Stabendfläche soll in Brennerachse liegen, wobei die Unterkante des Stabes 10 cm über der Dochtaustrittsöffnung sein soll. Beurteilt wird das Verhalten nach 4 Gütegraden W bis Z:

W: nach Herausnehmen aus der Flamme brennt der Stab länger als 2 min weiter,

X: weniger als 2 min,

Y: weniger als 15 s,

Z: der Stab brennt auch bei dauernder Flammeneinwirkung nicht.

Zu den unter b) genannten Verfahren (s. S. 246), bei denen als Heizquelle ein glühender Stab statt einer offenen Flamme verwendet wird, gehört das deutsche Verfahren zur Bestimmung der „Glutfestigkeit“ nach VDE 0305.

Auf Glutfestigkeit werden Träger stromführender Teile mehr oder weniger häufig beansprucht, während bei ihnen, von einzelnen Sonderfällen abgesehen, eine Zerstörung durch Schaltlichtbogen nicht in Frage kommt.

Die Beanspruchung eines Isolierteiles durch einen glühenden Leiter ist verschieden groß, je nach der Temperatur des Leiters, der Zeit der Einwirkung, der Masse des Leiters und des ihn unmittelbar berührenden Isolierstoffes, der Berührungsfläche, dem Berührungsdruck und ähnlichem.

Es sind zwei wesentliche Fälle zu unterscheiden:

betriebsmäßig vorkommende Glut an Teilen, die mit dem Isolierstoff in Berührung stehen, z. B. bei Heizgeräten, oder

unbeabsichtigtes Auftreten von Glut durch unvorschriftsmäßige Behandlung und Beanspruchung außerhalb des normalen Betriebes (schlechte Kontakte bei Installationsmaterial, mangelnde Sorgfalt in der Wartung und dadurch bedingte erhöhte Temperatur der Zuleitungsdrähte usw.).

Bei der Anwendung des Begriffes „Glutfestigkeit“ ist zu unterscheiden zwischen *Glutfestigkeit* und *Glutsicherheit*. Glutfestigkeit ist die Wider-

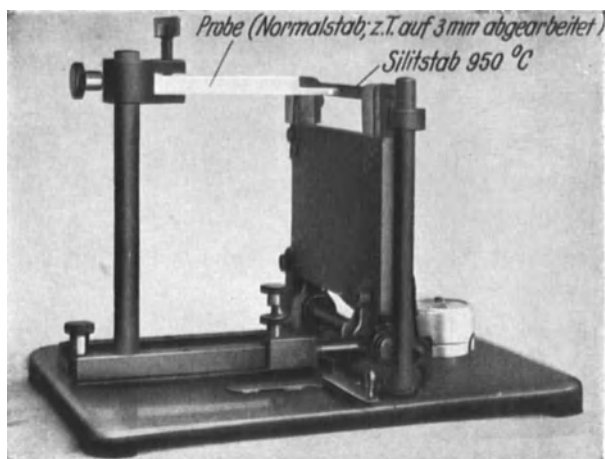


Abb. 167. Gerät zur Bestimmung der Glutfestigkeit nach SCHRAMM-ZEBROWSKI.

standsfähigkeit von Isolierstoffen gegenüber der Glut; sie wird in Stufen eingeteilt. Glutsicherheit ist eine Eigenschaft der fertigen Geräte. Sie ist nicht gestuft; sie ist durch die Konstruktion und die betriebsmäßige Beanspruchung des Gerätes und des Isolierteiles bedingt. Glutsicher sind Geräte und deren Isolierteile, die bei Glut betriebsmäßig vorhandener Leiter innerhalb vorgeschriebener Betriebsgrenzen keine ihren Gebrauch beeinträchtigende Veränderung erleiden.

Es ist Aufgabe der Sondervorschriften für einzelne Konstruktionsgebiete, den Zusammenhang zwischen der für bestimmte Isolierteile geforderten Glutsicherheit und der Glutfestigkeit der für diese Isolierteile zu verwendenden Isolierstoffe herzustellen.

Zur Bestimmung der Glutfestigkeit dient das Gerät nach SCHRAMM-ZEBROWSKI (Abb. 167). Ein Probekörper mit den Abmessungen  $3 \times 15 \times 120 \text{ mm}^3$  wird mit einem auf  $950^\circ$  elektrisch beheizten Glühstab aus Silit in Berührung gebracht; bei Stoffen geringer Brennbarkeit genügen auch kürzere Stäbe, so daß man in vielen Fällen diese Stäbe auch Fertigteilen entnehmen kann.



Nach 3 min Anliegen des Prüfkörpers am Glühstab oder bei stark brennbaren Stoffen in jenem Augenblick, in dem die durch Einwirkung des glühenden Stabes am Probestab entstandene Flamme dessen Einspannstelle erreicht, ist die Flamme am Probestab trocken zu löschen und der Stab herauszunehmen. Darauf ist der Gewichtsverlust in mg (auf 10 mg genau) und die Flammenausbreitung in cm zu bestimmen, wobei die Flammenausbreitung über 1 cm in der üblichen Weise nach oben oder unten auf ganze cm abzurunden ist. Bei Flammenausbreitung unter 1 cm ist auf ganze  $\frac{1}{10}$  cm abzurunden.

Ist bei stark brennbaren Stoffen der Versuch in weniger als 3 min beendet, so ist sowohl der gefundene Gewichtsverlust als auch die Flammenausbreitung auf die Zeit von 3 min umzurechnen, wobei man voraussetzt, daß beide Größen der Brennzeit proportional verlaufen. Das Produkt aus dem Gewichtsverlust in mg und der Flammenausbreitung in cm bildet einen Maßstab für die Glutfestigkeit.

Die Gütegrade stufen sich folgendermaßen ab:

Tabelle 24.

1	2	1	2	1	2
Produkt (mg × cm)	Gütegrad	Produkt (mg × cm)	Gütegrad	Produkt (mg × cm)	Gütegrad
über 100 000	0	10 000—1 000	2	100—10	4
100 000—10 000	1	1 000— 100	3	unter 10	5

Gütegrad 0 bezeichnet die völlig verbrennenden, Gütegrad 5 die unbrennbaren Stoffe.

**4. Verhalten bei tiefen Temperaturen.** Unter den mechanischen Eigenschaftsänderungen, die bei tiefen Temperaturen an Isolierstoffen auftreten können, interessieren in erster Linie die Änderungen der Schlagfestigkeit, da alle Stoffe bei tiefen Temperaturen mehr oder minder spröde werden. Zur Umschreibung des Verhaltens bei tiefen Temperaturen hat sich der Begriff „*Kältefestigkeit*“ herausgebildet. Der Begriff ist noch nicht eindeutig festgelegt; daher fehlt auch noch ein allgemein gültiges und allgemein anwendbares Prüfverfahren.

Am aufschlußreichsten zur Beurteilung der Kältefestigkeit ist die Bestimmung der Schlagfestigkeit bei verschiedenen Temperaturstufen (z. B. Stufen von je 10° im Bereich von +20° bis —60°); für laufende Betriebsprüfungen begnügt man sich jedoch meist mit *einer* Temperaturstufe.

So wird in den deutschen Vorschriften VDE 0302 für feste Isolierstoffe der Schlagbiegeversuch bei —20° vorgeschrieben. Diese Temperatur läßt sich z. B. durch eine Mischung von Eis mit Viehsalz etwa im Verhältnis 1: 2 bis 1: 1 erreichen. Es ist darauf zu achten, daß die Proben auch tatsächlich diese Temperatur annehmen; zu diesem

Zweck legt man die Proben zweckmäßig mindestens 20 min lang in die Kältemischung selbst. Unmittelbar vor dem Versuch wird die Probe aus der Kältemischung herausgenommen, wobei der mittlere Teil der Probe nicht mit den Händen berührt werden darf, und so schnell wie möglich geprüft. Da jedoch die Temperatur der Oberfläche für das Ergebnis beim Schlagversuch entscheidend ist, und die Oberflächentemperatur sich sehr schnell der Außentemperatur angleicht, ist zu empfehlen, die Probe auch während des Versuchs mit einer Kühlsole von  $-20^{\circ}$  zu berieseln.

Für Isolierstoffe, die in Form von Folien oder Schläuchen angewandt werden (Beispiel: Kunststoffe in der Kabel- und Leitungstechnik), ist von der I. G. Farbenindustrie AG., Ludwigshafen a. Rh., ein Gerät zur Beurteilung der Kältefestigkeit vorgeschlagen worden<sup>1</sup>.

Das Gerät besteht aus einem gut isolierten kühlbaren Probenraum, 6 Schlagwerken mit auswechselbaren Fallhämmern, die über dem Probenraum angeordnet sind, und einer Kühlkammer, in welcher strömende Luft mittels Kohlensäure-Schnee bis auf  $-40^{\circ}$  gekühlt werden kann. Als Probekörper können beliebige Proben (auch Abschnitte fertiger Erzeugnisse) verwendet werden. Für vergleichende Werkstoffuntersuchungen werden Streifen von  $15 \times 60 \text{ mm}^2$  und 0,5 mm Dicke vorgeschlagen, die im Probenraum in Schleifenform auf einem Amboß unter dem Schlagwerk eingespannt werden. Festgestellt wird die Temperatur, bei der die Probe bricht. Zur laufenden Betriebskontrolle kann die Prüfung bei konstanten Temperaturen erfolgen. Die Prüfung gilt als bestanden, wenn die Biegung der Schleife nicht bricht.

### β) Wechselbeanspruchungen

#### und langfristige Beanspruchungen durch Wärme.

Während die Wechselbeanspruchung vor allem für keramische Isolierstoffe zur Beurteilung wichtig ist, da hierbei leicht eine Zerrüttung des Gefüges bis zum Bruch möglich ist, sind die langfristigen Beanspruchungen von Interesse vor allem für organische Isolierstoffe, die dabei häufig so weitgehende stoffliche Änderungen erleiden können, daß die Betriebssicherheit gefährdet wird.

**1. Wechselbeanspruchung.** Zu den hierher gehörenden Verfahren für keramische Stoffe zählt das Verfahren des Verbandes Deutscher Elektrotechnischer Porzellanfabriken (VDEP) zur Bestimmung des *Widerstandes gegen schroffen Temperaturwechsel* („Temperaturwechselbeständigkeit“). Als Versuchskörper dienen Vollzylinder von 25 mm Höhe und 25 mm Dmr. Die Prüfkörper werden in einem geeigneten Ofen, der eine gleichmäßige Durchwärmung gewährleistet (zweckmäßig elektrisch beheizt und selbst regelnd) 30 min auf der jeweils gewünschten Temperatur gehalten. Sie werden dann in fließendem Wasser von 15 bis  $20^{\circ} \text{C}$  abgeschreckt.

<sup>1</sup> Kunststoffe Bd. 28 (1938) S. 171.

Die Körper fallen auf ein Drahtnetz oder Polster, bleiben 5 min im Kaltbad und werden danach erneut abgeschreckt. Nach jedem Versuch werden sie durch Augenbefund auf Vorhandensein von Sprüngen untersucht. Das wird erleichtert, wenn das Wasser mit einem Farbstoff (Alizarinrot, Methylenblau, Tinte) kräftig angefärbt war. Die gesprungenen Körper werden ausgezählt und ausgesondert. Die Temperatur des Luftbades wird, von 100° C beginnend, bei jedem Versuch um 10° erhöht, bis alle Prüfkörper gesprungen sind.

Zur Beurteilung der *Wärmewirkung* (effect of heat) auf *keramische Isolierstoffe* sind in den amerikanischen Vorschriften (A.S.T.M. D 116—34, 23/29) zwei Verfahren vorgesehen, von denen das eine (a) die Wirkung einer Temperaturwechselbeanspruchung, das andere (b) die Wirkung einer Wärmebeanspruchung bei 900° auf die Festigkeit zu erfassen sucht.

a) *Temperaturwechselbeständigkeit* (resistance to thermal change). Mindestens fünf 152 mm lange Rundstäbe ( $d = 28,6$  mm) werden 10 min in Eiswasser (0° C) gelagert, anschließend so schnell wie möglich in heißes Wasser (100° C) gelegt, dort 10 min gelagert und dieser Wechselbeanspruchung so häufig unterworfen bis sie brechen. Anzugeben ist die Zahl der Zyklen bis zum Bruch.

b) *Wirkung auf die mechanische Festigkeit* (effect on mechanical strength). Von 12 Rundstäben wie unter a) werden 6 Stäbe innerhalb 2 h auf 900° C im Ofen erhitzt, innerhalb 5 h im Ofen auf Raumtemperatur erkalten gelassen und anschließend zusammen mit den anderen 6 nicht behandelten Stäben auf Biegefestigkeit geprüft.

Anzugeben ist u. a. der Festigkeitsverlust durch die Wärmebehandlung (in % der Anfangsfestigkeit).

2. **Langfristige Wärmebeanspruchung.** Das unter b) im vorstehenden Abschnitt genannte Verfahren, das zur Ergänzung der Wechselbeanspruchung dient, gehört bereits sinngemäß zu den Prüfungen, deren gemeinsames Kennzeichen Anwendung langfristiger Wärmebeanspruchung ist. Meist wird als Maßstab der Abfall einer mechanischen Festigkeit bestimmt.

Hierher gehört auch das in den britischen Normen für Phenolharz-Preßstoffe B.S.S. Nr. 771 angegebene Verfahren zur Bestimmung der *Druckfestigkeit nach Wärmebeanspruchung*, obwohl die dort angegebene Beanspruchung noch zu kurz sein dürfte, um ein zutreffendes Bild für die Praxis zu erhalten. Die *Druckfestigkeit nach Wärmebeanspruchung* wird an 9,53 mm ( $\pm 0,13$  mm) hohen Zylindern mit 9,53 mm Dmr. ermittelt, die aus geeigneten Normalkörpern herausgearbeitet werden; die Zylinderachse soll in Preßrichtung liegen. Die Probe wird 12 h bei 130 bis 140°, dann 6 h bei 165° bis 175° und schließlich im Metallbad 30 min bei 390 bis 410° C gelagert. Nach Abkühlung wird die Probe innerhalb 1 min mit 227 kg belastet.

Wesentlich aufschlußreicher, aber sehr zeitraubend, sind die Prüfungen zur Bestimmung der **Dauer-Wärmebeständigkeit**.

Untersuchungen von R. NITSCHKE und E. SALEWSKI<sup>1</sup> an Kunstharz-Preßstoffen haben gezeigt, daß kurzfristige Versuche zur Beurteilung der Dauerwärmebeständigkeit unzureichend sind und zu einer falschen Bewertung des Stoffes führen können. Je niedriger die Versuchstemperatur ist, um so größer sind die bei kurzfristigen Versuchen möglichen Fehlbeurteilungen. Daher ist bei 100° C eine Versuchsdauer von

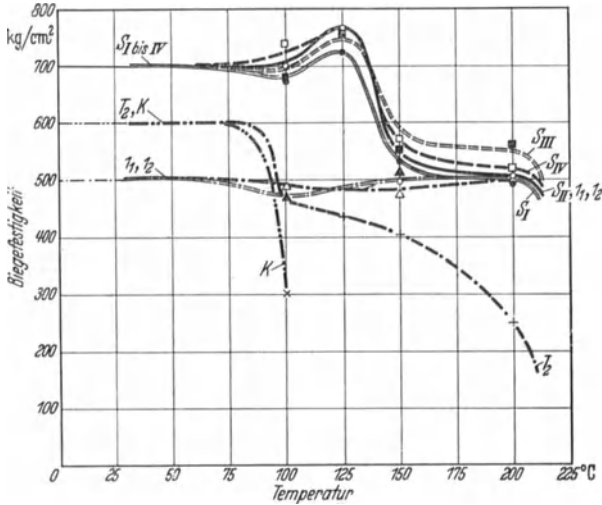


Abb. 168 a.

Abb. 168 a bis c. Änderung der Biegefestigkeit (a), Schlagbiegefestigkeit (b) und Schrumpfung (c) nach 200stündiger Warmlagerung von Kunstharz-Preßstoffen (S<sub>I</sub>: Typ S mit 50% Phenolharz, S<sub>II</sub>: mit 40% Phenolharz, S<sub>III</sub>: mit 50% Kresolharz, S<sub>IV</sub>: mit 40% Kresolharz; 11, 12, T<sub>2</sub>, K sind die Bezeichnungen für die betreffenden Typen).

mindestens 200 h, bei 200° C von mindestens 50 h notwendig; als erster Anhalt dürfte bei 200° notfalls bei Phenoplasten mit organischen Füllstoffen auch eine Versuchsdauer von 24 h genügen.

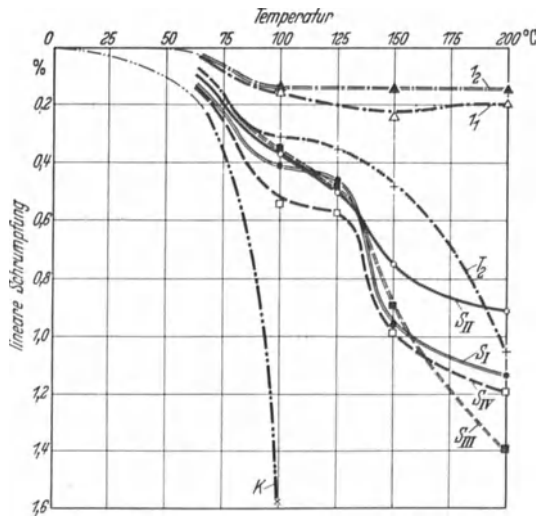
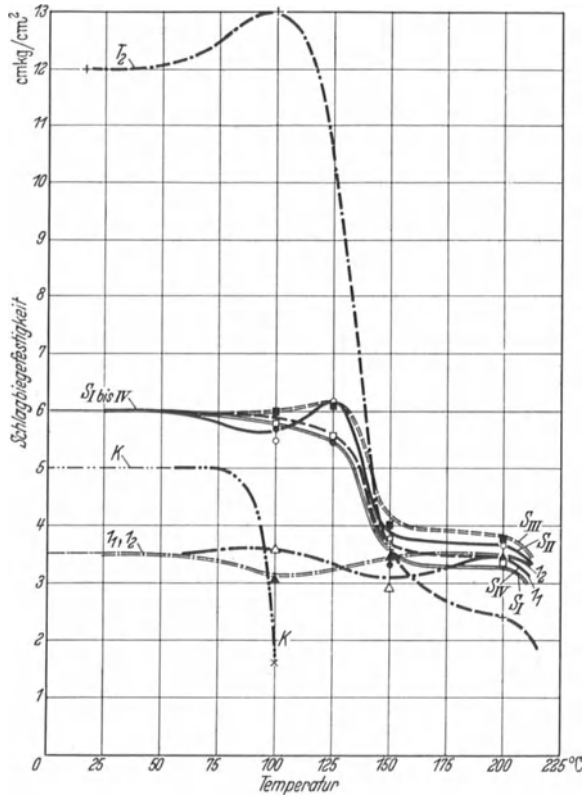
Der 10 mm dicke Normalstab hat sich als geeigneter Versuchskörper erwiesen. Dünnere Preßteile verhalten sich zwar meist günstiger; zur Schaffung ausreichender Sicherheit dürfen jedoch nicht die günstigsten Verhältnisse gewählt werden, zumal in neuerer Zeit für Sonderzwecke verhältnismäßig viel dickwandige Preßstücke verwendet werden.

Zur umfassenden Kennzeichnung der Wärmebeständigkeit ist die Darstellung der Eigenschaftsänderungen in Abhängigkeit von der Temperatur, etwa gemäß Abb. 168 a—c, notwendig. Durch eine einzige Zahl kann die Dauerwärmebeständigkeit nicht erschöpfend erfaßt werden. Zu ihrer Beurteilung sind diejenigen Eigenschaften heranzuziehen, die für den jeweiligen Verwendungszweck von Bedeutung sind.

<sup>1</sup> Vgl. R. NITSCHKE u. E. SALEWSKI: Plast. Massen Bd. 6 (1936) S. 411; Bd. 7 (1937) S. 6, 37.

Will man dennoch die Dauerwärmebeständigkeit lediglich durch die zulässige Höchsttemperatur angeben, so muß man willkürliche Festlegungen treffen hinsichtlich der zu berücksichtigenden Eigenschaften sowie hinsichtlich der bei der angegebenen Höchsttemperatur noch „zulässigen“ Eigenschaftsverschlechterungen und der Zeit.

Dementsprechend hat man in der neuen Fassung der VDE-Leitsätze für nichtkeramische gummifreie Isolierpreßstoffe (VDE 0320) folgende Festlegungen getroffen: Maßstab für die Wärmebeständigkeit sind die „zulässigen Höchsttemperaturen bei dauernder und kurzzeitiger Wärmebeanspruchung“. Als zulässige Höchsttemperatur bei dauernder Wärmebeanspruchung ist diejenige Temperatur festgelegt worden, der der Preßstoff dauernd ausgesetzt sein kann, ohne — nach Abkühlen auf Raumtemperatur von  $20 \pm 5^\circ$  — seine mechanischen Eigenschaften nennenswert, d. h. mehr als 10%, verschlechtert zu haben. Unter „dauernd“ sind dabei nicht



etwa Wochen oder Monate, sondern Jahre zu verstehen. Bei kurzzeitig auftretenden Wärmebeanspruchungen sind naturgemäß höhere Temperaturen als bei dauernder Wärmebeanspruchung zulässig. Die in VDE 0320 angegebenen „zulässigen Höchsttemperaturen bei kurzzeitiger Wärmebeanspruchung“ gelten für 200 h Wärmeeinwirkung. Die zulässige Höchsttemperatur ist abhängig von der Eigenschaft, die für den jeweiligen Verwendungszweck wichtig ist.

Man hat zur Kennzeichnung den Abfall der Biege- und Schlagbiegefestigkeit sowie die Schrumpfung gewählt und diejenigen Temperaturen angegeben, bei denen nach 200 h Wärmeeinwirkung die Festigkeiten um höchstens 10% abgenommen haben und eine Schrumpfung von höchstens 0,6% erreicht wird.

Zur Ermittlung dieser „Höchsttemperaturen“ sind Normalstäbe ( $10 \times 15 \times 120 \text{ mm}^3$ ) 200 h bei verschiedenen Temperaturen (z. B.  $100^\circ$ ,  $125^\circ$ ,  $150^\circ$  usw.) zu lagern. Vor und nach der Lagerung sind Biege- und Schlagbiegefestigkeit, nach der Lagerung die Schrumpfung (Änderung der Länge) bei Zimmertemperatur zu bestimmen. Bei welchen Temperaturen die Lagerung durchzuführen ist, richtet sich nach der Stoffart; allgemein gültige Angaben können nicht gemacht werden. Die Ergebnisse werden in der Form der Abb. 168a bis c eingetragen und aus dem Kurvenverlauf werden die Temperaturen ermittelt, bei denen der Festigkeitsabfall 10%, die Schrumpfung 0,6% beträgt.

## 5. Optische Prüfungen.

In den Anfängen der Isolierstofftechnik waren optische Prüfungen bedeutungslos. Den ersten Anstoß zu lichttechnischen Untersuchungen gab die Einführung farbiger Isolierstoffe durch die Entwicklung der Harnstoffharze. Die farbigen Kunstharz-Preßstoffe traten in Wettbewerb zu den bisher üblichen braunen und schwarzen, und es machte sich der Wunsch nach Prüfverfahren zur Ermittlung des Farbtones und der Farbbeständigkeit geltend. Wiederum eine grundlegende Änderung trat ein durch die Entwicklung durchscheinender und durchsichtiger Isolierstoffe mit bestimmten optischen Eigenschaften, die in Wettbewerb zu dem uralten Werkstoff Glas der optischen Industrie treten konnten. Damit rücken alle optischen Prüfungen in den Arbeitsbereich des Isolierstofftechnikers. Noch nicht abzusehen ist die Entwicklung, inwieweit optische Prüfungen für die Beurteilung des chemischen Aufbaues und der Polymerisation der Kunststoffe heranzuziehen sind. Im Grenzgebiet zwischen dem optischen und elektrischen Gebiet liegen die physikalischen Untersuchungen der Kunststoffe mit Röntgenstrahlen, die zur Ermittlung der Aushärtung, der Lunkerbildung u. a. schon herangezogen worden sind.

Für die glasklaren Isolierstoffe (z. B. Polystyrol, Akrylsäureester mit ihren zahlreichen Abarten<sup>1</sup>, sowie ferner die klaren und durchscheinenden Phenol- und Harnstoffzeugnisse) kommen folgende optische Eigenschaften in Betracht:

- a) Lichtbrechung,
- b) optische Homogenität,
- c) Lichtdurchlässigkeit.

Ferner interessieren für praktische Verwendung:

- d) Farbton,
- e) Lichtbeständigkeit,
- f) optische Oberflächeneigenschaften.

#### a) Lichtbrechung.

Bei Eintritt eines homogenen Lichtstrahles aus einem Medium 1 in ein anderes 2 tritt eine Brechung des Lichtstrahles auf, und zwar gilt für das Lichtbrechungsvermögen  $n$ , wenn der Einfallswinkel (spitzer Winkel zwischen einfallendem Strahl und Einfallslot) gleich  $\alpha$ , und der Brechungswinkel (spitzer Winkel zwischen gebrochenem Strahl und Einfallslot) gleich  $\beta$  ist:

$$n = \frac{\sin \alpha}{\sin \beta}.$$

Ist der Isolierstoff bereits in Form eines optischen Prismas für lichttechnische Zwecke hergestellt, so erfolgt die Ermittlung des Lichtbrechungsvermögens  $n$  im Spektrometer. Die Meßverfahren sind im „Lehrbuch der praktischen Physik“ von KOHLRAUSCH eingehend beschrieben. Öfter wird jedoch an den Techniker die Frage nach dem Brechungsindex von Stoffen gerichtet, die in Form von Platten oder sonstigen Formkörpern vorliegen. Ebenso wird bei isolierenden Flüssigkeiten wie Lacken die Frage nach dem Brechungsindex gestellt. Für die Ermittlung dieser Eigenschaften stehen technische Geräte zur Verfügung, die nicht nur die Messung des Brechungsindex in Abhängigkeit von der Wellenlänge des Lichtes, sondern auch in Abhängigkeit von der Temperatur gestatten. Die bekanntesten Geräte sind die Refraktometer von ABBE und PULFRICH<sup>2</sup>. Sie beruhen auf der Erscheinung der Totalreflektion.

Eine horizontale, nach oben liegende Fläche eines 90gradigen Prismas aus stark brechendem Glas wird mit dem zu untersuchenden Objekt in Berührung gebracht (Abb. 169). Durch die zweite, senkrecht stehende Fläche wird die Grenzlinie des in das Objekt fallenden Lichtstreifens beobachtet. Aus dem mittels Fernrohr und Teilachse gemessenen Winkels  $\alpha$ , unter dem der Grenzstrahl die vertikale Fläche des Prismas

<sup>1</sup> Eine Übersicht über die Eigenschaften der verschiedenen polymeren Akrylsäureester siehe Mod. Plastics Bd. 14 (1936) S. 40.

<sup>2</sup> PULFRICH: Z. Instrumentenkde. Bd. 15 (1895) S. 389.

verläßt, und dem bekannten Brechungsindex  $n_{Pr}$  des Prismas erhält man mit Hilfe einer Tabelle den Brechungsindex  $n$  der zu untersuchenden

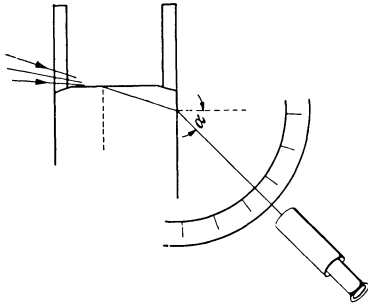


Abb. 169. Strahlengang im Refraktometer nach PULFRICH.

Substanz für das benutzte Licht einer Natrium-Dampf Lampe. Zur Aufnahme von Flüssigkeiten ist auf das Prisma eine Glasröhre gekittet. Der Streifen-einfall des Lichtes erfolgt über die gekittete Stelle hinweg. Feste Körper werden mit zwei nahezu senkrecht zueinander stehenden Flächen versehen, von denen die horizontale plan sein muß, während die senkrechte Fläche nur anpoliert zu sein braucht, damit Licht einfallen kann. Eine bestimmte Anforderung an die Größe

der senkrechten Fläche besteht nicht, so daß Objekte von beliebiger Dicke bis zur Deckglasdicke herunter untersucht werden können. Für

die schnelle Untersuchung von Flüssigkeiten in Abhängigkeit von der Temperatur ist auf dem 90 gradigen Prisma außer dem Flüssigkeitszylinder eine Heizeinrichtung vorgesehen. Die Erwärmung geschieht mittelbar entweder durch einen konstant temperierten Warmwasserstrom, der durch den Apparat hindurchgeleitet wird, oder durch den Dampf siedenden Wassers bzw. anderer siedender Flüssigkeiten<sup>1</sup>. Brechungsindizes und Temperaturabhängigkeit des Brechungsindex verschiedener Kunststoffe sind in der Abb. 170 wiedergegeben. Aus der Abbildung geht hervor, daß die Messung des

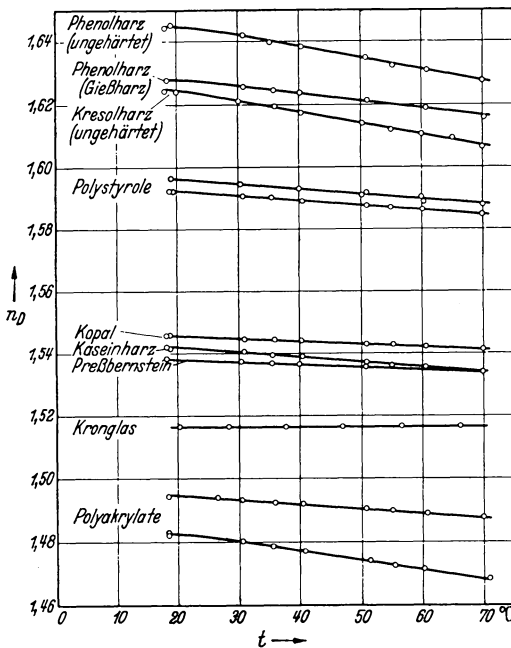


Abb. 170. Brechungsindizes einiger Kunststoffe in Abhängigkeit von der Temperatur (nach R. VIEWEG).

<sup>1</sup> Über Justierung, Beleuchtungseinrichtung und weitere Einzelheiten der Verwendung siehe Beschreibung und Gebrauchsanweisung des Pulfrichschen Refraktometers der Firma Carl Zeiß.



Brechungsindex ein einfaches Verfahren zur Definition durchsichtiger oder durchscheinender Isolierstoffe darstellt.

### b) Optische Homogenität.

Die Verwendung von Kunststoffen für optische Zwecke setzt eine Homogenität des Isolierstoffes voraus. Als optische Verwendung gilt hier z. B. auch die Verwendung als Schutzscheibe, sofern durch derartige Gläser oder Scheiben optische Beobachtungen vorgenommen werden müssen. Die Prüfung auf Homogenität erfolgt nach der Schlieren-Methode<sup>1</sup>. Ist die Inhomogenität durch Spannung in dem Körper, z. B. durch einseitigen Druck, schlechten Temperatenausgleich oder anderes, hervorgerufen, so entstehen im Werkstoff die bekannten Erscheinungen der Doppelbrechung, die zwischen gekreuzten Nikolschen Prismen durch teilweise Aufhellung des Gesichtsfeldes erkennbar sind. Das Verfahren ist sehr empfindlich. Von den Askania-Werken in Berlin werden Spannungsprüfer hergestellt, bei denen als Polarisator ein geeignet gebogener Spiegel aus schwarzem Glas von einer elektrischen Lampe beleuchtet wird. Die Spannung des Körpers zeigt sich nicht durch Aufhellung im dunklen, sondern durch Farbänderung in einem violetten Feld. Das Verfahren der Doppelbrechung in Isolierstoffen unter Druck wird benutzt zur Ermittlung der Spannungsverteilung in Werkstücken<sup>2</sup>. Von SCHULZ<sup>3</sup> ist das Verfahren zur quantitativen Bestimmung der Spannung ausgebildet worden.

### c) Lichtdurchlässigkeit.

In jedem Mittel nimmt die Lichtamplitude bei dem Durchlaufen der Strecke von einer Wellenlänge  $\lambda$  im Verhältnis  $e^{-2\pi\kappa}$  ab. Die Konstante  $\kappa$  ist eine Stoffkonstante und heißt Absorptionsindex, die Größe  $K = \kappa \cdot n$  ( $n =$  Brechungsindex) heißt Absorptionskoeffizient. Dieser ist mit dem Durchlässigkeitskoeffizienten  $a$  durch folgende Gleichung verbunden:

$$a = e^{-\frac{4\pi\kappa n}{\lambda}}$$

Der Durchlässigkeitskoeffizient, d. h. der Bruchteil des eintretenden Lichtes, der von der Schichtdicke 1 cm eines Mediums durchgelassen wird, ist eine für den Stoff charakteristische Konstante. Die Durchlässigkeit wird im allgemeinen photometrisch durch Vergleich zweier konstanter Lichtströme ermittelt. Die zu prüfende Substanz wird dabei in möglichst planparalleler Schicht in den Strahlengang gebracht. Die Absorption hängt in den meisten Mitteln von der Farbe des Lichtes ab

<sup>1</sup> OSTWALDS Klassiker Bd. 157 und 158.

<sup>2</sup> FÖPPL u. NEUBER: Festigkeitslehre mittels Spannungsoptik. München u. Berlin 1935.

<sup>3</sup> SCHULZ: Z. Instrumentenkde Bd. 33 (1913) S. 205.

und ist deshalb im einfarbigen Lichte zu bestimmen. Eine Einrichtung zur Messung der Absorption ist in der Abb. 171 a und b wiedergegeben. Eine kleine Glühlampe von 4 V ist zwischen zwei Mollschen Thermosäulen angebracht. Zu jeder Seite der Lampe befindet sich eine Glasküvette. Die Thermosäulen sind gegeneinander und unter Zwischenschaltung gleicher Nebenschlüsse mit einem Galvanometer in Reihe geschaltet. Der eine Nebenschluß ist als Draht mit Gleitkontakt ausgebildet. Das Gerät

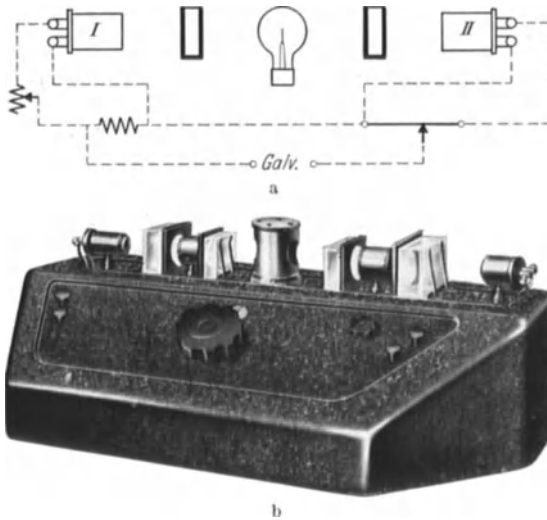


Abb. 171 a und b. Anordnung und Ausführung einer Einrichtung zur Bestimmung des Absorptionskoeffizienten.

wird so eingestellt, daß die Strahlung der Lampe, wenn die beiden Küvetten mit derselben Flüssigkeit (z. B. dem Lösungsmittel) gefüllt sind, in den beiden Nebenschlüssen gleiche Ströme erzeugt und folglich das Galvanometer in der Nullstellung bleibt. Ein kleiner Ausschlag infolge ungenügender Symmetrie wird mittels eines eingebauten Regelwiderstandes auf Null zurückgebracht. Wenn die Flüssigkeit, die in

der linken Küvette enthalten ist, trübe oder absorbierend wird, wird die Strahlung auf die linke Thermosäule vermindert und das Galvanometer schlägt aus. Dieser Ausschlag wird mit Hilfe des regelbaren Nebenschlusses auf Null zurückgebracht. Der Nebenschluß ist bei der Ausführung nach Kipp & Zonen mit einer Skala verbunden, die eine unmittelbare Ablesung der Lichtdurchlässigkeit, d. h. des Prozentsatzes der Auslöschung infolge der Lichtabsorption gestattet. Eine zweite Teilung gibt unmittelbar die Größe des Absorptionskoeffizienten an. Mit dem Durchgang des Lichtes durch Trennflächen verschiedener Brechungsmittel, z. B. Glas-Flüssigkeit, sind infolge der Reflexion Schwächungen des Lichtes verbunden und besondere Korrekturen anzubringen. An Stelle der Glasküvetten können die zu untersuchenden Platten aus Kunststoff eingeschoben und die Absorption in Abhängigkeit von der Plattendicke ermittelt werden.

Von I. G. KLINE und M. B. AXILROD<sup>1</sup> sind Messungen der Lichtdurchlässigkeit für weißes Licht mit Hilfe einer Photozelle elektrisch

<sup>1</sup> KLINE, I. G. u. M. B. AXILROD: J. Franklin Inst. Bd. 222 (1936) S. 628.

an durchsichtigen Kunststoffen aus Acrylat beschrieben worden. Gleichzeitig wurde die Lichtdiffusion in Prozent als das Verhältnis der gestreuten Lichtmenge zur insgesamt auffallenden Lichtmenge angegeben. Von den Behörden der Vereinigten Staaten wird für die Lichtdurchlässigkeit ein Mindestwert von 68% gefordert der innerhalb von 30 Tagen nach der Herstellung zu messen ist. Die heute üblichen durchsichtigen Kunststoffe besitzen eine Lichtdurchlässigkeit von durchweg 85% und mehr. Höchstwerte für die Streuung (Lichtdiffusion) sind zahlenmäßig noch nicht festgelegt.

#### **d) Farbton.**

Eine einheitliche Farbskala für Isolierstoffe liegt bisher noch nicht fest. Die Vereinbarungen bestimmter Farbtöne zwischen Lieferanten der Preßmassen und den Pressereien stößt auch auf gewisse Schwierigkeiten, da die Farbtöne des Fertigteiles von der Preßtemperatur und Preßzeit abhängen. Trotz allem scheint eine Festlegung der Farbtöne durch Vergleich mit Musterkarten wünschenswert. Bei farbigen Isolierteilen ist dies geradezu notwendig, wenn Nachlieferungen oder Ersatzteile angefordert werden. Physikalische Meßeinrichtungen zur Festlegung des Farbtones haben sich bisher nicht eingeführt, die Bestimmung erfolgt lediglich durch subjektiven Vergleich mit einer Farbskala.

#### **e) Lichtbeständigkeit.**

Die Änderung des Farbtones bei Belichtung oder Bestrahlung mit ultraviolettem Licht läßt sich bisher zahlenmäßig schwer erfassen. In Amerika sind Prüfgeräte entwickelt worden, die die Stoffproben einer starken ultravioletten Bestrahlung, verbunden mit Beanspruchung durch Wärme, Feuchtigkeit u. a. aussetzen. Damit ist jedoch lediglich ein Anhalt für die Eigenschaften der Probe gewonnen, ohne diese jedoch auf eine physikalische Grundlage zurückzuführen. Eine zahlenmäßige Bewertung ist dagegen noch nicht möglich.

#### **f) Optische Oberflächeneigenschaften.**

Für die Verwendung durchsichtiger Proben für optische Zwecke spielen die Oberflächeneigenschaften eine besondere Rolle. Der normale Glanz bei der Herstellung soll sich im Gebrauch nicht verlieren und der Werkstoff durch Veränderung seiner Oberfläche nicht die guten optischen Eigenschaften binnen kurzem einbüßen. Organische Isolierstoffe, die als Ersatz für Gläser in Frage kommen, besitzen eine wesentlich geringere Härte bzw. Kratzfestigkeit als die mineralischen Gläser. Zur Ermittlung der Ritz- oder Kratzfestigkeit ist ein Gerät aus der Metallprüfung, der Bierbaum-Mikrocharakter übernommen worden. Dieser erzeugt mit einem würfelförmigen Diamanten unter verschiedenen Gewichtsbelastungen auf der Oberfläche der Stoffproben Kratzfurchen, wobei das

Quadrat der Furchenbreite der Belastung proportional ist. Man erhält unabhängig von der Belastung für jeden Stoff einen Wert für die Ritzhärte als Verhältnis von Belastung zu Furchenbreite<sup>1</sup>.

Bei den nicht lichtdurchlässigen Isolierstoffen werden optische Oberflächenprüfungen, sei es mit dem Mikroskop oder nach dem SCHMALTZschen Lichtschnittverfahren, vorgenommen. Mikroskopische Prüfungen geben einen interessanten Einblick in die Zusammensetzung des Werkstoffes<sup>2</sup>.

Bei den mikroskopischen Prüfungen sind zwei Arten von Versuchskörpern zu unterscheiden:

a) Dünnschliffe, d. h. planparallele Platten, die so dünn sind, daß sie mit durchfallendem Licht betrachtet werden können,

b) Anschliffe, d. h. einseitig angeschliffene polierte Isolierstoffoberflächen.

Die Herstellung von Dünnschliffen wird wie folgt ausgeführt: Von den zu prüfenden Werkstoffen wird ein Stück von etwa 12 mm Durchmesser und 1 bis 2 mm Dicke mit einer Metallsäge abgeschnitten und stufenweise auf feinerem Glaspapier von Nr. 1 bis 0000 auf der einen Seite geglättet. Sodann wird auf einer mit angefeuchtetem Schmirgel versehenen Glasplatte nachgeschliffen. Nach Trocknen und Abwaschen wird die glatte Seite mit einer Lösung von Zellhorn in Azeton auf eine Messingfläche aufgeklebt. Das Dünnschleifen erfolgt sodann von Hand auf immer feinerem Glaspapier und zum Schluß auf der Glasplatte. Die Schliffe werden nach Befeuchten mit Azeton von der Messingfläche abgehoben und unter das Mikroskop gebracht. Je nach der Helligkeit des Stoffes ist für den Dünnschliff eine Dicke von 0,02 bis 0,04 mm erforderlich. Schliffe von 0,01 mm Dicke haben keinen Zusammenhalt mehr und zerfallen beim Ablösen oder auch beim Schleifen. Die Anschliffe werden mit einer Filzscheibe, die mit Maschinenöl und feinem Schmirgel bestrichen ist, hergestellt. Kennzeichen eines guten Anschliffes ist eine unter dem Mikroskop festgestellte Kratzfreiheit der Oberfläche. Bei stärkster Vergrößerung ist daher Polieren mit Eisenoxyd notwendig. Durch Einfärben der Dünn- oder Anschliffe tritt das Gefüge des Isolierstoffes sichtbar zutage. Als Farbstoffe kommen Methylenblau und Fuchsin in Frage. Vorher sind dünne Harzschichten wegzuätzen, als Ätzmittel können Mineralsäuren oder auch Laugen gleichzeitig mit der Färbung angewandt werden. Abb. 172 zeigt einen Dünnschliff, von Typ S, Abb. 173 das Oberflächengefüge des Types T im Dunkelfeld. Die modernen Mikroskope mit Kamera sind so ausgebildet, daß ihre Aufstellung und Bedienung verhältnismäßig wenig Platz erfordert. Neben den verschiedenen Beobachtungen im durchfallenden und auffallenden Licht

<sup>1</sup> KLINE, J. G. u. M. B. AXILROD: J. Franklin Inst. Bd. 222 (1936) S. 628.

<sup>2</sup> WEIGEL: VDI, Kunst- u. Preßstoffe 1937 Heft 1 u. 2 S. 2. — Kunststoffe Bd. 28 (1938) S. 5.

bei Hell- und Dunkelfeldbeleuchtung können gleichzeitig mikro- und makrophotographische Aufnahmen gemacht werden. Zum unmittelbaren Vergleich zweier verschiedener Oberflächen, wie er für Kunstharzerzeugnisse zweier verschiedener Hersteller manchmal wünschenswert ist, ist ein Vergleichsmikroskop von der Firma Busch entwickelt worden. Ein eingebautes Teilungsprisma gestattet, daß im gleichen runden Blickfeld die verschiedenen Flächen zur Hälfte erscheinen. Dieses Gerät kann nicht nur für große Objekte, sondern auch für runde Teile verwendet werden, die im Gesichtsfeld eben abgebildet werden.

Eine andere optische Prüfung ist die Ermittlung der Rauigkeit. Theoretisch kann die Rauigkeit dadurch ermittelt werden, daß man einen Schnitt durch das Werkstück anbringt und das Profil der Oberfläche mikroskopisch betrachtet. Diese Art der Prüfung setzt eine Zerstörung des Werkstückes und eine absolut gratfreie Bearbeitung durch Schneidwerkzeuge voraus. Um eine Beurteilung der Werkstoffflächen ohne Zerstörung zu ermöglichen, wurde von SCHMALTZ<sup>1</sup> das sog. Lichtschnittverfahren entwickelt. Auf den Werkstoff fällt etwa unter 45° ein helles Lichtband und beleuchtet sozusagen nur an einer Schnittkante, dem „Lichtschnitt“, die Unebenheiten der Werkstoffoberfläche. Diese erleuchtete Schnittkante wird mittels eines Mikroskops beobachtet und gibt das Profil der Oberfläche wieder. Je nachdem, welche Profilhöhen beobachtet werden sollen, ist die Vergrößerung des Objektivs zu wählen. Das ursprünglich nur für Zwecke der Metalltechnik entwickelte Verfahren läßt sich auch auf die Isolierstoffprüfung übertragen. Während man es jedoch bei den bearbeiteten Metallflächen mit regelmäßigen Profilkurven zu tun hat, liegen bei den Kunststoffen die Verhältnisse schwieriger, da die Oberflächen uneinheitlich sind und man auch bei sauberen Isolierstoffflächen mikroskopische Stellen findet, die einen glatten Lichtschnitt geben. Darüber hinaus können die Füllstoffe in den



Abb. 172. Dünnschliff von Typ S.

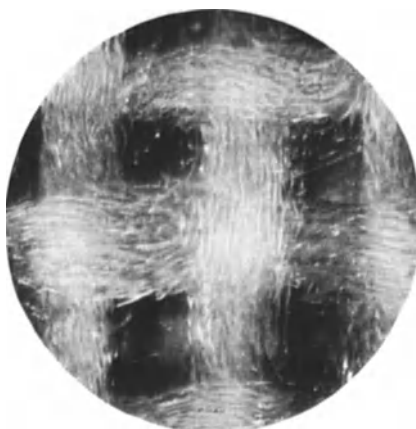


Abb. 173. Oberflächengefüge von Typ T.

<sup>1</sup> SCHMALTZ, G.: Technische Oberflächenkunde, Berlin 1936; ferner F. STREIFF: Technische Oberflächenkunde, Schweizer Arch. angew. Wiss. Techn. Bd. 5 (1939) S. 194.

Kunststoffen bei dem Lichtschnittverfahren Unebenheiten und Profile vortäuschen, die in Wirklichkeit nicht vorhanden sind.

Mit der Rauhgigkeit eng verbunden ist der Glanz der Oberfläche. Zur Beurteilung der Kunststoffoberflächen wurde daher auch diese Eigen-

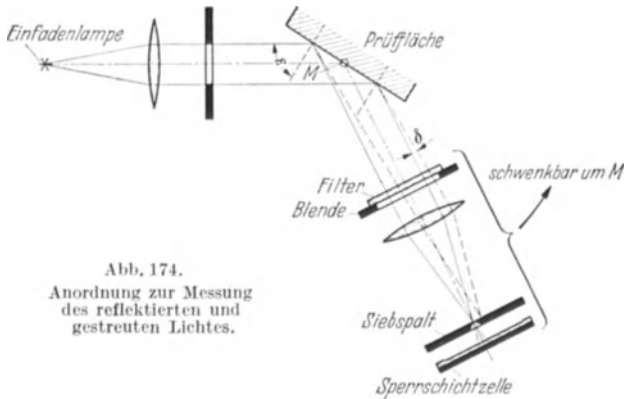


Abb. 174.  
Anordnung zur Messung  
des reflektierten und  
gestreuten Lichtes.

schafft, insbesondere mit Rücksicht darauf, daß das SCHMALTZsche Lichtschnittverfahren bei Kunststoffen zu Fehlschlüssen führen kann, für die Beurteilung der Oberflächen herangezogen.

Von KLINGELHÖFFER und MÜLLER<sup>1</sup> wurde das an Kunststoffflächen reflektierte und gestreute Licht photometrisch ermittelt. Die Anordnung ist in der Abb. 174 gezeigt. Eine Einfadenlampe wirft ein paralleles Lichtbündel unter dem Polarisationswinkel auf die Prüfliche. Die Einfadenlampe wird durch Filter und einen Siebspalt auf der Sperrschichtzelle abgebildet. Durch Drehen des Spektrometerarmes um den Punkt M wird das an der Prüfliche nach links und rechts diffus reflektierte Licht photometrisch gemessen. Man hofft auf diese Weise Anhaltspunkte über Rauhgigkeit und Oberflächenbeschaffenheit zu erhalten.

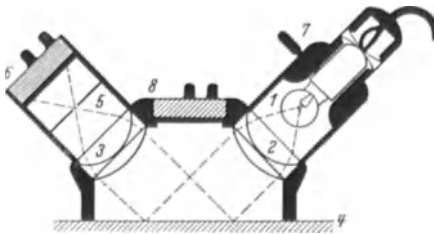


Abb. 175. Lichtelektrischer Glanzmesser.

Einen direkten lichtelektrischen Glanzmesser zur objektiven Bestimmung des Glanzes sowie der Politur zeigt die Abb. 175, aus der Aufbau und Strahlengang ersichtlich ist. 1 ist eine Punktlampe, 2 und 3 Objektive. Das vom Prüfling reflektierte Licht fällt durch eine Lochblende auf ein Photoelement, das mit einem direkt zeigenden Galvanometer verbunden ist. Regelt man den Ausschlag für einen Körper bekannten Glanzes auf den entsprechenden Wert, so ist der prozentuale Glanzwert anderer Stoffe unmittelbar an einer Sonderskala ablesbar. Das Photoelement kann auch an die Stelle 8 der Abb. 175 gebracht werden, wodurch die diffuse Reflexion meßbar wird<sup>2</sup>. Der Glanzmesser kann gleichzeitig zur Messung des diffusen Reflexionsvermögens und der Lichtdurchlässigkeit benutzt werden.

<sup>1</sup> KLINGELHÖFFER, H. u. H. MÜLLER: Kunststoffe Bd. 29 (1939) S. 14.

<sup>2</sup> Hersteller: Dr. B. Lange, Berlin-Zehlendorf, Hermannstraße.

Schließlich haben optische Meßverfahren für die Ermittlung der linearen Ausdehnung der Kunststoffe im optischen Ausdehnungsmesser (Abb. 154, S. 230) Verwendung gefunden.

## 6. Chemische Prüfungen.

### a) Allgemeines.

Die chemischen Prüfungen haben zwei grundsätzlich verschiedene Aufgaben zu erfüllen:

1. mittels chemischer Analyse die Zusammensetzung der Isolierstoffe zu ermitteln,
2. das Verhalten gegenüber Chemikalien, d. h. die „chemische Beständigkeit“ zu erfassen.

Die erste Aufgabe ist bereits an anderer Stelle im Abschnitt II B („Chemische Zusammensetzung“, S. 17) behandelt worden.

Die zweite Aufgabe wird im folgenden behandelt und umfaßt das Verhalten der Isolierstoffe auch gegenüber Wasser und Luft (vgl. „Alterung“, S. 281), da kein grundsätzlicher Unterschied zwischen diesen Agenzien und anderen „Chemikalien“ besteht.

Für die Beurteilung elektrischer Isolierstoffe sind die Verfahren zur Bestimmung der chemischen Beständigkeit von großer Bedeutung, insbesondere die Verfahren, die das Verhalten gegenüber Wasser („Feuchtigkeit“) zu erfassen gestatten. Denn diese Einflüsse sind neben den Temperatureinflüssen wohl die in der Praxis am häufigsten vorkommenden und bewirken vielfach recht beträchtliche bleibende oder vorübergehende Eigenschaftsänderungen.

Die Prüftechnik ist bisher leider noch nicht ausreichend durchgebildet. Im allgemeinen begnügt man sich mit der Lagerung von Proben bestimmter Abmessungen in dem betreffenden Agens bei bestimmter Temperatur, wobei die Proben *allseitig* beansprucht werden, und benutzt als Kennzeichen für die Stoffänderungen die Änderung einer bestimmten Eigenschaft, zuweilen auch nur die Änderung des Aussehens. Diese Art der Prüfmethodik hat schwere Mängel. Die chemische Beständigkeit ist nämlich — wie andere Eigenschaften auch — gestaltabhängig. Die Prüfung an nur *einem* Probekörper kann daher zu Fehlbeurteilungen führen (s. S. 16). Die *allseitige* Beanspruchung ist bei symmetrischen Prüfkörpern, z. B. beim Normalstab,  $10 \times 15 \times 120 \text{ mm}^3$ , nachteilig, da die z. B. durch Quellung auftretenden mechanischen Spannungen bei *allseitiger* Beanspruchung sich leicht ausgleichen können, so daß die Beurteilung häufig zu günstig ausfällt. Ferner sind die Prüfkörper meist zu dick, sofern nicht nur Änderungen der Oberfläche, sondern auch die Tiefenwirkung erfaßt werden sollen. Hierfür sind möglichst dünne Prüfkörper vorzuziehen, um die Versuchsdauer abzukürzen.

Im Staatlichen Materialprüfungsamt Berlin-Dahlem sind zur Beseitigung dieser Mängel als Ergänzung zu den Prüfungen an Normalprüfkörpern zusätzlich kastenförmige Prüfkörper ausgebildet worden mit den Außenabmessungen  $30 \times 60 \times 120 \text{ mm}^3$  und den Wanddicken 2, 3, 4 mm sowie treppenförmig abgesetzten Wänden von 1 bis 4 mm

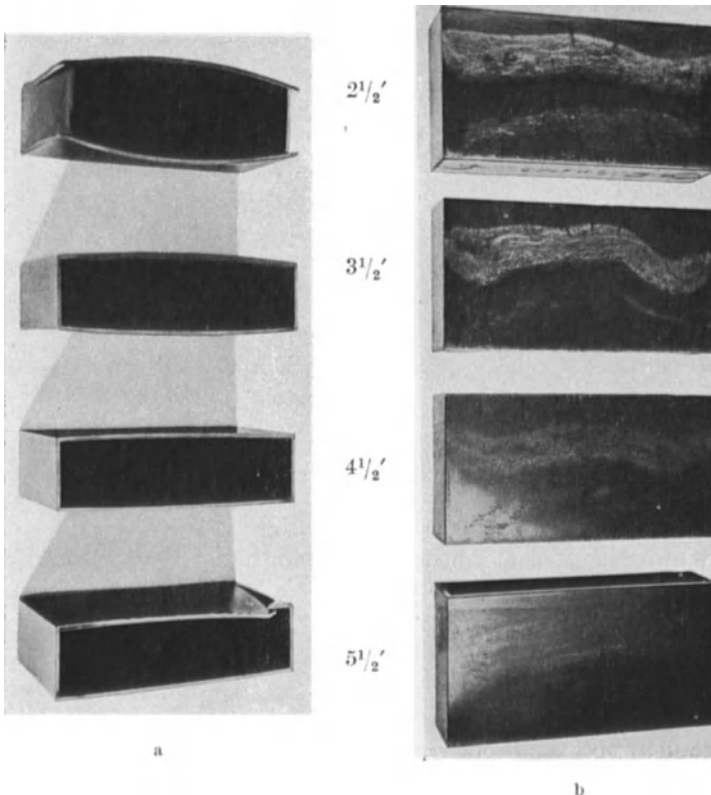


Abb. 176 a und b. Wirkung von Wasser auf Kästen aus Typ K in Abhängigkeit von der Prüfzeit (von oben nach unten:  $2\frac{1}{2}$ ,  $3\frac{1}{2}$ ,  $4\frac{1}{2}$ ,  $5\frac{1}{2}$  min Prüfzeit bei 3 mm Wanddicke). a nach Füllung mit heißem Wasser (Zustand der Kästen 24 h nach Ausgießen des Wassers nach Abkühlung); b nach  $\frac{1}{2}$  h Lagerung in kochendem Wasser (Kochprüfung).

Dicke (vgl. Abb. 26 a bis d, S. 56). Die absichtlich ungünstige Gestalt dieser Prüfkörper läßt bei einseitiger Flüssigkeitswirkung, wie sie z. B. beim Füllen der Kästen mit Wasser auftritt, sehr schnell Mängel des Isolierstoffes erkennen, da z. B. durch Quellung auftretende mechanische Spannungen oft schon in Stunden zum Bruch des Kastens führen (vgl. Abb. 176 a).

Vielfach beurteilt man die Wirkungen *ausschließlich* an Hand der Änderung elektrischer Eigenschaften, z. B. der dielektrischen Verluste.



Die elektrischen Eigenschaften sind aber gegenüber chemischen Einwirkungen so sehr empfindlich, daß man sie nur dann als Kennzeichen benutzen sollte, wenn tatsächlich *nur* die Änderung der elektrischen Eigenschaften von Interesse ist oder wenn man *sehr kleine* Änderungen anderer Eigenschaften erfassen will. Anderenfalls ist sehr leicht eine Fehlbeurteilung möglich.

Ein weiterer häufiger Mangel in der Prüfmethodik ist die ungenügende Unterscheidung zwischen

*vorübergehenden und bleibenden*

Eigenschaftsänderungen unter der Wirkung von Chemikalien. Im allgemeinen wird nämlich so verfahren, daß vor und nach Lagerung in einem bestimmten Agens eine bestimmte Eigenschaft ermittelt wird, daß aber die Zeit zwischen Ende der Lagerung und Ausführung der Prüfung nicht festgelegt wird. Diese Zeit ist aber sehr wichtig, um vorübergehende und bleibende Änderungen genau erfassen zu können. So kann z. B. unter der Wirkung einer Lagerung in Wasser die mechanische Festigkeit sehr stark absinken, nach der Lagerung in Wasser jedoch nach ausreichend langer Lagerung an Luft den ursprünglichen Wert wieder erreichen. Wird die Prüfung auf die Festigkeit *unmittelbar* nach der Wasserlagerung vorgenommen, so erfaßt man im wesentlichen die vorübergehenden *und* bleibenden Änderungen, nach ausreichend langer Luftlagerung dagegen nur die bleibenden Änderungen. Für die Isolierstoffanwendung sind naturgemäß beide Änderungswerte wichtig, insbesondere dann, wenn der Isolierstoff wechselnden chemischen Einflüssen ausgesetzt ist. Bisher ist diese Tatsache in den Prüfvorschriften noch nicht ausreichend berücksichtigt worden. Bei ungenügender Berücksichtigung liegt die Gefahr nahe, daß weder die bleibende noch die vorübergehende Eigenschaftsänderung klar erfaßt wird und daß außerdem die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse in Frage gestellt ist.

**b) Wirkung von Wasser.**

Fast alle Isolierstoffe kommen im Gebrauch mit Wasser in Berührung, sei es Wasser in Form von Wasserdampf, sei es in flüssiger Form. Die Einwirkung kann vorübergehend sein (Regen), in der Intensität wechseln (Luft- und Erdbodenfeuchtigkeit) oder auch dauernd sein (Unterwasseranlagen), bei Raumtemperatur oder bei höheren Temperaturen wirken (Schwitzwasser in Kellerräumen oder in Wäschereien u. ä.). Die Kenntnis der Wasserwirkung und ihre Prüfung ist daher von großem Interesse, zumal unter den organischen Isolierstoffen nicht ein einziger ist, der als *absolut* wasserbeständig bezeichnet werden kann. Allerdings kennt man organische Isolierstoffe, die selbst bei dauernder jahrelanger Wasserwirkung so geringe Mengen Wasser aufnehmen oder so wenig durchlässig für Wasserdampf sind, daß die dadurch bedingten Eigenschaftsänderungen für die praktische Anwendung meist unwesentlich sind.

Zur Beurteilung der Wasserwirkung sind Prüfverfahren ausgearbeitet worden, die man je nach dem Zweck in eine der folgenden Gruppen einreihen kann:

Verfahren zur Bestimmung von  $\alpha$ ) Wasseraufnahme bei Lagerung der Proben in Wasser oder Wasserdampf (Luft mit bestimmtem Feuchtigkeitsgehalt);  $\beta$ ) Durchlässigkeit für Wasser und Wasserdampf;  $\gamma$ ) Verhalten gegen kochendes Wasser.

#### $\alpha$ ) Wasseraufnahme.

Die Verfahren der ersten Gruppe (Wasseraufnahme) können in einigen Fällen auch dazu verwendet werden, die *Porosität* eines Isolierstoffes zu bestimmen (vgl. S. 175). Im übrigen sollen sie jedoch ein Bild über

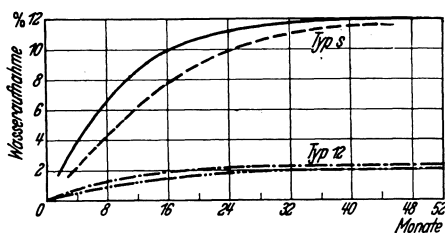


Abb. 177. Wasseraufnahme von organisch (Typ S) und anorganisch (Typ 12) gefüllten Kunstharz-Preßstoffen. Wirkung von Wasser — — —, Wirkung von Wasserdampf --- ---.

das Verhalten gegenüber Wasser bieten. Zur sicheren Urteilsfindung ist dabei stets anzustreben, die Untersuchungen möglichst bis zur Sättigung des Stoffes mit Wasser durchzuführen oder — falls der Isolierstoff lösliche Anteile enthält — bis zum Erreichen des Gleichgewichtszustandes. Dazu sind lange Versuchszeiten — in vielen

Fällen Jahre — erforderlich. Kurzfristige Beobachtungen können ein falsches Bild vermitteln. So können sich zwei Stoffe zwar anfangs sehr verschieden verhalten, da unter anderem die Geschwindigkeit der Wasseraufnahme verschieden sein kann; der Endzustand kann jedoch bei beiden Stoffen gleich sein. Sofern man aus Zeitmangel auf kurzfristige Versuche sich beschränken muß, ist unbedingt Kenntnis und Auswertung der chemischen Zusammensetzung des Stoffes notwendig, vor allem Kenntnis des physikalischen und chemischen Verhaltens der Einzelbestandteile eines Isolierstoffes gegenüber Wasser. Der bekannteste Kunstharz-Preßstoff Typ S, der im wesentlichen aus Phenolharz und Holzmehl besteht, nimmt z. B. bei dauernder Lagerung in Wasser bis zur Sättigung, d. h. nach etwa 3 Jahren, so viel Wasser auf, wie das Holzmehl ohne Bindemittel (Harz) aufnehmen würde, d. h. das Bindemittel wirkt nicht absolut wasserschützend, sondern verzögert lediglich die Wasseraufnahme<sup>1</sup> (vgl. Abb. 177). Da die Verzögerung sehr erheblich ist und der Isolierstoff in der Praxis meist nicht dauernd, sondern vielfach nur von Zeit zu Zeit in feuchter oder nasser Umgebung ist, so daß der Stoff wiederholt austrocknen kann, so genügen solche Stoffe dennoch den praktischen Anforderungen.

<sup>1</sup> ZEBROWSKI, W.: ETZ Bd. 52 (1931) S. 1353.

Aus Abb. 177 ist ersichtlich, daß kein grundsätzlicher Unterschied zwischen der Wirkung von *Wasser* und *Wasserdampf* vorliegt. Die Unterschiede liegen nur in der Geschwindigkeit der Aufnahme, die bei flüssigem Wasser größer ist als bei Wasserdampf. Vielfach wird man daher auf Prüfung in Wasserdampf verzichten können.

Bei der Bestimmung der Wasseraufnahme sind Größe der Schnittflächen, Probengestalt (Verhältnis der Gesamtoberfläche zum Volumen) und die Dauer der Einwirkung wichtige Faktoren. Leider weichen die in verschiedenen Ländern üblichen Verfahren in dieser Hinsicht stark voneinander ab (s. Tabelle 25).

Tabelle 25. Genormte Verfahren zur Bestimmung der Wasseraufnahme.

Land	Verfahren	Probengestalt	Vorbehandlung	Dauer der Wasserlagerung h	Prüf- temperatur ° C
Deutsch- land	VDE 0318 für Hartpapier- und Hartgewebeplatten (für formgepreßte Stoffe noch kein Verfahren)	120 × 15 mm <sup>2</sup> Dicke wie angeliefert	keine	96	15—25
England	BERA Ref. B/S 3 für formgepreßte und für geschichtete Stoffe	50 mm Dmr. 10 mm Dicke	bei 50° C bis zur Gewichtskonstanz	24	Raumtemp.
Ver. Staaten	A.S.T.M. D 48—37 für formgepreßte Isolierstoffe	101,6 mm Dmr., 3,18 mm Dicke für warmgepreßte, 6,25 mm Dicke für kaltgepreßte Stoffe	Für leicht erweichende Stoffe: 24 h im Exsikkator oder bei 50 ± 5° C im Ofen. Für schwer erweichende Stoffe: 24 h bei 100 ± 5° C	48	52 ± 2
	A.S.T.M. D 229—37 T <sup>1</sup> für Schichtstoffe	76,2 × 25,4 mm <sup>2</sup> Dicke wie angeliefert	1 h bei 105—110° C	2 und 24, sowie bis zur Sättigung	25 ± 2 für 2 und 24 h 20 b. 30 für Sättigung

Bei der Darstellung der Versuchsergebnisse von Dauerversuchen ist es vielfach zweckmäßig, für die Zeitordinate den logarithmischen Maßstab zu wählen, da der Verlauf von Wasseraufnahme und Eigenschaftsänderungen klarer zum Ausdruck kommt.

<sup>1</sup> Noch keine endgültige Norm; daher im Text nicht weiter erwähnt.

Bei der Beurteilung ist darauf zu achten, daß die Größe der Wasseraufnahme allein noch keine ausreichende Bewertungsgrundlage ist, sofern man nicht die durch die Wasseraufnahme bedingten, für die Praxis wichtigen Eigenschaftsänderungen kennt. Häufig verzichtet man daher auf unmittelbare Messung der Wasseraufnahme und mißt statt dessen die Änderung einer charakteristischen Eigenschaft.

So wird z. B. in den deutschen *Isolierstoff*-Vorschriften VDE 0302 die Wasserwirkung durch Messung des Oberflächenwiderstandes nach 24 Stunden Lagern in Wasser bei Raumtemperatur erfaßt (vgl. S. 162).

In den deutschen VDE-Vorschriften für einzelne Isolierstoffgruppen ist außerdem die unmittelbare Bestimmung der Wasseraufnahme vorgesehen, z. B. in VDE 0330 für *natürliche Gesteine (Marmor, Schiefer)*.

Alle Marmor- und Schiefersorten nehmen Wasser auf. Als Schutz gegen das Eindringen von Feuchtigkeit wird nach vorheriger Trocknung Schiefer meistens allseitig, einschließlich der Bohrlöcher lackiert, während Marmor vorderseitig und an den Kanten poliert und auf der Rückseite mit Ölfarbe oder dgl. gestrichen wird. Da man sich aber auf die Unversehrtheit des Lacküberzuges nicht stets verlassen kann, sollen Sorten mit übergroßer Wasseraufnahme durch die Prüfung ausgeschieden werden.

Für den Versuch ist eine roh geschliffene Probplatte mit den Abmessungen  $10 \times 50 \times 50 \text{ mm}^3$  anzuwenden. Abweichungen bis zu 15 mm in der Dicke sind zulässig.

Die Platte wird in einem Raum von etwa  $70^\circ$  48 h lang getrocknet, sodann gewogen und 24 h lang in Wasser von etwa  $20^\circ$  gelegt. Nach dem Herausnehmen wird die Oberfläche mit einem Tuch abgetrocknet und das Stück erneut gewogen.

Für Schichtstoffe — *Hartpapier* und *Hartgewebe* — ist in den deutschen Vorschriften VDE 0318 gleichfalls ein Verfahren angegeben, bei dem die Wasseraufnahme unmittelbar gemessen wird. Erforderlich sind 5 Versuchsstücke (aus Platten geschnitten),  $120 \text{ mm} \times 15 \text{ mm} \times$  Plattendicke. Die Wasseraufnahme wird bezogen auf das vor dem Versuch ermittelte Gewicht und wird in Prozenten angegeben. Die Versuchsstücke sind erst kurz vor Beginn des Versuches zuzuschneiden und ohne Vorbehandlung zu prüfen.

Die Versuchsstücke werden in destilliertes Wasser von Raumtemperatur ( $15$  bis  $25^\circ$ ) eingelegt. Die Versuchsdauer beträgt 4 Tage, zur Feststellung von Anhaltswerten genügt eine Versuchsdauer von 1 Tag. Nach dem Versuch sind die Versuchsstücke von äußerlich anhaftendem Wasser durch Abtrocknen mit Fließpapier zu befreien und innerhalb von 2 min nach dem Herausnehmen aus dem Wasser zu wägen.

Da die Harzschichten quer zur Schichtung wenig Wasser durchlassen, dringt dieses in der Hauptsache in der Schichtrichtung ein. Die Wasseraufnahme und die Zeit des Eindringens ist daher zunächst stark von der

Form der Versuchsstücke, besonders von dem Verhältnis der Schichtflächen zu den Stirnflächen, also von der Plattengröße und -dicke abhängig. Sie wird auch durch die Art des Schnittes beeinflusst. Wenn z. B. die Schnittflächen durch die Säge verschmiert wurden, wird das Eindringen von Feuchtigkeit erschwert. Je nach der Zahl der Harzträgerschichten, der Harzträgerdicke und dem Harzgehalt des Schichtstoffes, sowie der Art des verwendeten Harzträgers (Papier oder Gewebe) wird der Widerstand, den der Schichtstoff dem Eindringen des Wassers entgegensetzt, und demnach die für die Sättigung erforderliche Zeit, sehr verschieden sein. Als maßgebend wird die Wasseraufnahme der Versuchsstücke nach 4tägigem Liegen in Wasser betrachtet, obwohl nach dieser Zeit eine Sättigung noch lange nicht erreicht ist. Die Werte der zulässigen Wasseraufnahme für Hartpapier und Hartgewebe sind aus den Schaulinien in Abb. 178 zu entnehmen.

Hierbei ist vorausgesetzt, daß der zu prüfende Schichtstoff sachgemäß aufbewahrt wurde und nicht durch Lagerung in feuchten Räumen oder irgendwelche anderen Zufälligkeiten bereits vorher erhebliche Mengen Wasser aufgenommen hatte.

Für *keramische Isolierstoffe* sind deutsche VDE-Vorschriften in Vorbereitung. Die bisher üblichen Verfahren des Verbandes Deutscher Elektrotechnischer Porzellanfabriken (VDEP) haben verschiedene Aufgaben: Ein Verfahren dient zur Ermittlung der *Saugfähigkeit*, ein anderes zur unmittelbaren Bestimmung der *Wasseraufnahme*.

Die Prüfung auf *Saugfähigkeit*, die auch einen Anhalt für die *Porosität* gibt (s. S. 175), wird an Bruchstücken fertiger Isolatoren oder Isolierteile vorgenommen (entsprechend den Vorschriften VDE 0446). Die Prüfstücke werden in eine Lösung von 1 g Fuchsin in 100 g Methylalkohol gelegt; sie sind darin zu beanspruchen mit 600 at/h, wobei der Druck mindestens 150 at betragen soll (also z. B. 4 h bei 150 at oder 3 h bei 200 at usw.). Wird nach Zerschlagen der Prüfstücke festgestellt, daß das Farbmittel in den Werkstoff eingedrungen ist, so entspricht er nicht den Bedingungen.

Als Prüfkörper für die Prüfung auf *Wasseraufnahme* werden Bruchstücke von etwa 50 g verwendet. Die Stücke werden 3 h bei 150° getrocknet, gewogen,  $\frac{1}{4}$  h in Vakuum (50 mm Hg) gelagert, noch im Vakuum mit

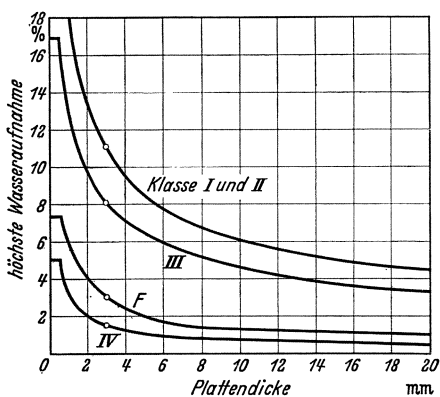


Abb. 178. Höchstwerte der Wasseraufnahme von Hartpapieren (Klassen I bis IV) und Hartgewebe F nach 4tägigem Lagern in Wasser. (Nach VDE 0318.)

Wasser übergossen und bleiben anschließend 12 h unter Wasser bei normalem Druck. Nach dem Erkaltenlassen der Stücke im Wasser werden sie mit einem feuchten Tuch sorgfältig abgetupft und gewogen. Die Differenz der Gewichte vor und nach dem Versuch ergibt die Gewichtszunahme in Prozenten.

In den britischen Vorschriften für *Isolier-Preßstoffe* — BERA B/S 1 — ist die Messung der *Wasseraufnahme* an einer  $5 \times 50 \times 50$  mm<sup>3</sup> großen Platte vorgesehen. Die Probe wird in einer Trockenvorrichtung bei Raumtemperatur bis zur Gewichtskonstanz getrocknet, gewogen, 24 h in Wasser von Raumtemperatur gelegt und nach Entfernen der Oberflächenfeuchtigkeit wieder gewogen, möglichst auf mg genau. Die Feuchtigkeitsaufnahme ist in Prozenten des Anlieferungsgewichtes anzugeben.

In den britischen Vorschriften für *Phenolharz-Preßstoffe* — BSS Nr. 771/1938 3 — ist neben der Bestimmung des Oberflächenwiderstandes nach 24 h Liegen in Wasser auch die unmittelbare Bestimmung der Wasseraufnahme vorgesehen.

Zur Bestimmung der *Wasseraufnahme* und *Quellung* werden 12 mm dicke gepreßte Scheiben mit 50 mm Dmr. verwendet, deren Oberfläche allseitig um mindestens 0,5 mm abgeschliffen wird, so daß die so vorbereitete Scheibe  $10 \pm 0,2$  mm dick ist bei einem Durchmesser von  $48 \pm 0,2$  mm. Nach 1stündiger Lagerung bei 50° mit anschließender Abkühlung im Exsikkator wird die Probe gewogen, genau gemessen (Dicke und Durchmesser) und dann 165 bis 170 h (7 Tage) in dest. Wasser bei  $20 \pm 5^\circ$  C gelagert. 15 min vor und 5 min nach Beendigung der Wasserlagerung wird die Probe wieder gewogen und gemessen.

Die amerikanischen Vorschriften für *keramische Isolierstoffe* sehen die Prüfung auf Wasseraufnahme (water absorption) (A.S.T.M. D 116—34, 32/35) nur für poröse keramische Stoffe vor zur Beurteilung der *Porosität* (vgl. S. 175).

Verwendet werden Bruchstücke, insgesamt 20 bis 50 g; die Bruchflächen müssen mindestens 25 % der Gesamtoberfläche betragen. Nach 2stündigem Erwärmen bei 120° und anschließendem Abkühlen im Exsikkator auf Raumtemperatur wird die Probe gewogen und 30 min in kochendem destillierten Wasser gelagert. Nach Abkühlen in destilliertem Wasser von rd. 20° C wird die Oberfläche mittels weichen Tuches abgewischt und die Probe gewogen. Auszuführen sind mindestens 5 Einzelversuche.

Anzugeben sind Gewicht vor und nach Wasserlagerung, Wasseraufnahme in Prozenten (Einzel- und Mittelwerte).

Auch für *Isolier-Preßstoffe* sind in den amerikanischen Vorschriften Angaben über Prüfung auf Wasseraufnahme enthalten (A.S.T.M. D 48—33, 22/25).

Als Probe dient eine gepreßte Scheibe, 161,6 mm Dmr., 3,18 mm dick bei warmgepreßten, 6,35 mm dick bei kaltgepreßten Stoffen;

zulässige Abweichungen bei warmgepreßten Stoffen  $\pm 5\%$ , bei kaltgepreßten  $\pm 10\%$ .

Je nach der Erweichungstemperatur werden die im Anlieferungszustand gewogenen Proben einer Vorbehandlung bei verschiedenen Temperaturen unterzogen. Bei mäßig hohen Temperaturen erweichende Materialien werden 24 h entweder bei Raumtemperatur im Exsikkator oder bei  $50^\circ \pm 5^\circ \text{C}$  vorbehandelt. Bei höheren Temperaturen erweichende Materialien werden 24 h bei  $100^\circ \pm 5^\circ \text{C}$  vorbehandelt (getrocknet). Danach läßt man die Proben im Exsikkator abkühlen und wiegt sie bei Raumtemperatur. Drei so vorbehandelte Proben werden 48 h bei  $25^\circ \pm 2^\circ \text{C}$  in Wasser gelagert und nach Abwischen der Oberfläche mittels trocknen Tuches wieder gewogen.

Anzugeben sind Gewicht der Proben in g

a) im Anlieferungszustand

b) nach der Vorbehandlung

c) nach der Wasserlagerung,

Wassergehalt in Prozenten, ermittelt aus a und b, Wasseraufnahme in Prozenten, ermittelt aus c und b.

In den französischen Vorschriften für *Isolier-Preßstoffe* hatte man früher als Prüfkörper einen Becher (Abb. 179) vorgesehen, der zugleich zur Bestimmung der Durchschlagsfestigkeit diente. Der Becher wurde durch einen Mittelschnitt zerteilt, die Hälften gewogen, 24 h bei  $100^\circ$  getrocknet und nach Abkühlung auf  $20^\circ$  wieder gewogen, dann 100 h in Wasser von  $20^\circ$  gelegt, nach dem Herausnehmen mit einem trockenen Tuch abgewischt und wieder gewogen.

Jetzt wird in den französischen Vorschriften für *Isolierpreßstoffe* (U.S.E. 1937/38—46) das Verhalten gegen Wasser (*Tenue dans l'eau*) an Platten,  $3 \times 100 \times 100 \text{ mm}^3$ , oder an Scheiben,  $3 \pm 0,25 \text{ mm}$  dick, 100 mm Dmr., bestimmt.

Von 4 Proben werden 2 ungeteilt, 2 geteilt (halbiert; Schnittlänge 100 mm) geprüft. Nach 8stündiger Lagerung bei 15 bis  $25^\circ$  über Chlorcalcium werden die gewogenen Proben bei 15 bis  $25^\circ$  in Wasser gelagert, danach sofort mit einem Lappen abgetrocknet und nach 30 min Lagerung an der Luft (15 bis  $25^\circ \text{C}$ , 60 bis 80% relative Feuchtigkeit) wieder gewogen.

Angegeben wird der Mittelwert der Gewichtsänderungen a) der ungeteilten, b) der geteilten Proben in Prozenten.

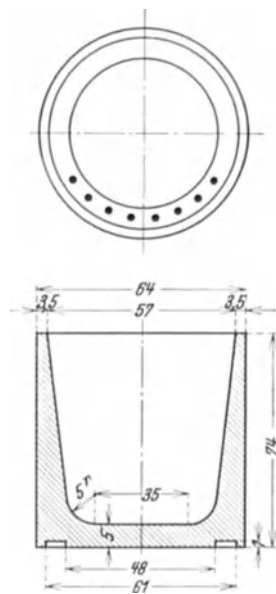


Abb. 179. Prüfbecher zur Bestimmung der Wasseraufnahme und der Durchschlagsfestigkeit nach den früheren französischen Vorschriften U.S.E. 46.

Alle diese bisher in den verschiedenen Ländern genormten Verfahren entsprechen noch nicht voll den eingangs gestellten Forderungen. Besonders bei *organischen Kunststoffen* ist zu beachten, daß die Wasseraufnahme von Kunststoffen bei hoher Luftfeuchtigkeit oder bei Lagerung in Wasser für viele Anwendungen störend wegen der ungünstigen Wirkung auf elektrische Eigenschaften und Maßhaltigkeit ist. Andererseits tritt bei Verlust des normalen Feuchtigkeitsgehaltes durch Wärme — insbesondere bei Zellulose- und Kasein-Kunststoffen — Versprödung auf. Für die *Beständigkeit der Kunststoffe* ist also auch der Feuchtigkeitsgehalt des Stoffes wichtig. Bei künstlichen Wetterfestigkeitsprüfungen führt Feuchtigkeitswechsel in der Luft zu einer schnelleren Zerstörung der Proben als bei entsprechenden Prüfungen ohne Feuchtigkeitswechsel. Die „Bell-Telephone“-Laboratorien haben dementsprechend ein Prüfverfahren für Kunstharz-Überzüge entwickelt, bei dem in wöchentlichen Perioden 3 Tage 90% relative Feuchtigkeit bei 35° C, 1 Tag 15% relative Feuchtigkeit bei 52° C, 3 Tage 50% relative Feuchtigkeit bei 24° C auf die Proben wirkt<sup>1</sup>.

#### β) Durchlässigkeit für Wasser und Wasserdampf.

Die Kenntnis der Durchlässigkeit von Isolierstoffen für Wasser und Wasserdampf ist wichtig insbesondere bei Anwendung von Isolierstoffen in der Leitungstechnik.

Während Blei als Kabelmantel völlig wasserundurchlässig ist, sind es organische Kunststoffe nicht. Die Durchlässigkeit ist zwar häufig außerordentlich gering, in Anbetracht der hohen Anforderungen, die an Kabel gestellt werden, jedoch von Belang. Geeignete Prüfverfahren zur Erfassung der Durchlässigkeit sind daher notwendig.

Allen bisher bekannt gewordenen Verfahren im In- und Ausland ist gemeinsam, daß man die eine Seite des zu prüfenden Kunststoffes mit Wasser oder feuchter Luft (Wasserdampf) in Berührung bringt und die durchgelassene Wassermenge auf der anderen Seite in geeigneter Weise mißt, zweckmäßig unter Verwendung eines getrockneten Luftstromes.

Die Bestimmung kann geschehen durch Absorption der Feuchtigkeit und Wägung des Trockenmittels oder durch Messung der Druckveränderung. Der Durchtritt des Wassers erfolgt in Dampfform und gehorcht dem Fickschen Gesetz. In dieses gehen ein die Diffusionskonstante  $K$ , die durchgegangene Menge Wasser  $m$ , die Dicke  $d$ , die Oberfläche  $q$ , das Druckgefälle  $p_1 - p_0$  und die Zeit  $t$ . Es besteht die Beziehung:

$$K = \frac{m d}{q (p_1 - p_0) t}.$$

<sup>1</sup> Vgl. A. E. SCHUH u. H. C. THEURER: Physical Evaluation of Finishes. Industr. Engng. Chem., Anal. Ed. Bd. 6 (1934) S. 91.



Die Diffusionskonstante gibt also an, wieviel g Wasser in 1 h unter einer Dampfdruckdifferenz von 1 mm Hg durch einen cm-Würfel diffundiert. Von den Größen der FICKSchen Gleichung lassen sich Dicke, Zeit und Oberfläche durch Messung leicht bestimmen. Es bleiben als weitere Größen, die zur Ermittlung der Diffusionskonstanten zu bestimmen sind, das Druckgefälle und die durchgetretene Wassermenge. Diese wird im allgemeinen gravimetrisch erfaßt; beachtenswert ist ein Verfahren von W. NAGEL und E. BRANDENBURGER, wonach die Wassermenge titrimetrisch bestimmt wird<sup>1</sup> (Abspaltung von Salzsäure aus Zinnsäurechlorid durch Wasser, Einleiten der Salzsäure in Bariumhydroxydlösung und Titration dieser Lösung).

**Bestimmung an Folien**<sup>2</sup>. Häufig werden Isolierstoffe in Folienform geprüft. Die Folie wird z. B. sorgfältig an eine Glasglocke angekittet. Das Innere der Glasglocke ist durch einen Schliff mit einem Wägeröhrchen verbunden, in dem sich Phosphorpentoxyd befindet. Die Glasglocke ruht auf einem Gefäß, das Wasser enthält. Der Nachteil dieser Methode liegt darin, daß weder das Druckgefälle noch die durchgetretene Wassermenge genau bestimmbar sind. Die Absorption des Wasserdampfes, der diffundiert ist, wird stets eine gewisse Zeit beanspruchen, so daß im Innern der Glasglocke der Wasserdampfdruck deutlich von Null verschieden ist. Aus diesem Grunde ist obige Apparatur dahingehend verbessert worden, daß ein gut getrockneter Luftstrom das durchgetretene Wasser sofort dem Wägeröhrchen zuführt und dort an das Trockenmittel abgibt. Die Strömungsgeschwindigkeit des Luftstromes muß nach Untersuchung von JENCKEL und FR. WOLTMANN<sup>3</sup> so groß sein, daß die Wasserkonzentration Null auf der Folienoberfläche erreicht und somit das größtmögliche Konzentrationsgefälle geschaffen wird. Dadurch wird aber sowohl das Druckgefälle als auch die Größe  $m$  sicher und genau bestimmbar. Das Dampfdruckgefälle ergibt sich aus dem Dampfdruck des Wassers bei der herrschenden Temperatur und dem Dampfdruck auf der anderen Seite der Folie, der gleich Null ist;  $m$  wird durch Wägung des Absorptionsröhrchens bestimmt.

Als Beispiel für die Versuchsausführung unter Berücksichtigung der Strömungsgeschwindigkeit sei die von JENCKEL und WOLTMANN gewählte Anordnung beschrieben.

Die Luft wird einer Stahlflasche entnommen und ihre Strömungsgeschwindigkeit in einem Strömungsmesser bestimmt. Dieser besteht aus einem mit konzentrierter Schwefelsäure gefüllten Manometer, das den Druckabfall über einer 13,7 cm langen und 0,6 mm weiten Kapillare angibt. Zur vollständigen Trocknung wird der Luftstrom dann durch

<sup>1</sup> Wiss. Veröff. a. d. Siemens-Werken Bd. 13 (1939) S. 217.

<sup>2</sup> Vgl. u. a. E. BADUM: Kautschuk Bd. 14 (1938) S. 231.

<sup>3</sup> Kunststoffe Bd. 28 (1938) S. 235.

2 Waschflaschen mit konzentrierter Schwefelsäure und 3 mit Phosphor-pentoxyd und Glaswolle gefüllte Trockentürme geleitet. Zur Anwärmung strömt die Luft weiter durch eine Spirale aus Bleirohr, die sich im Thermostaten befindet, und gelangt dann in das eigentliche Meßgerät, das in Abb. 180 wiedergegeben ist.

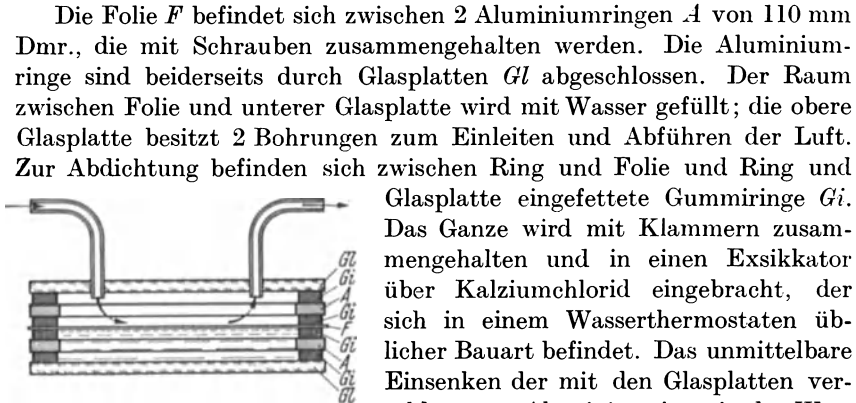


Abb. 180. Anordnung zur Messung der Wasserdampfdurchlässigkeit nach JENCHEL und WOLTMANN.  
F Folie, A Aluminiumring; Gl Glasplatte; Gi Gummiring.

Die Folie *F* befindet sich zwischen 2 Aluminiumringen *A* von 110 mm Dmr., die mit Schrauben zusammengehalten werden. Die Aluminiumringe sind beiderseits durch Glasplatten *Gl* abgeschlossen. Der Raum zwischen Folie und unterer Glasplatte wird mit Wasser gefüllt; die obere Glasplatte besitzt 2 Bohrungen zum Einleiten und Abführen der Luft. Zur Abdichtung befinden sich zwischen Ring und Folie und Ring und Glasplatte eingefettete Gummiringe *Gi*. Das Ganze wird mit Klammern zusammengehalten und in einen Exsikkator über Kalziumchlorid eingebracht, der sich in einem Wasserthermostaten üblicher Bauart befindet. Das unmittelbare Einsenken der mit den Glasplatten verschlossenen Aluminiumringe in das Wasser des Thermostaten hat sich nicht bewährt, da stets kleine Wassermengen trotz der Gummidichtungen aus dem

Thermostatenwasser eindringen und die Messung fälschen. Zur Wägung des von dem Luftstrom von der Folienoberfläche mitgenommenen Wassers dienen zwei mit Phosphor-pentoxyd und Glaswolle gefüllte Wägetröhrchen. Den Abschluß bildet eine Waschflasche, die bis dicht an den unteren Rand des Einleitungsrohres mit konzentrierter Schwefelsäure gefüllt ist und ein rückwärtiges Eindringen von Feuchtigkeit in die Wägetröhrchen verhindert<sup>1</sup>.

Um eine sichere Einstellung der Temperatur zu erreichen, wird mit der Messung erst 24 h nach Einstellung der Temperatur im Thermostaten begonnen, und zwar nachdem bereits 1 h vorher der Luftstrom mit einer Strömungsgeschwindigkeit eingestellt worden ist, die einem Staudruck von 120 mm  $H_2SO_4$  entspricht. Die so gefundenen Werte sind auf 1,5 bis 2% reproduzierbar.

**Bestimmung an Schläuchen.** Die Wasserdampfdurchlässigkeit ist in sehr starkem Maß von dem Isolierstoff-Herstellungsverfahren abhängig<sup>2</sup>. Ein Isolierstoff hat in Folienform eine andere Durchlässigkeit als in Schlauchform. Will man also ein zuverlässiges Urteil fällen über die Brauchbarkeit eines Isolierstoffs, der z. B. als Kabelmantel verwendet wird, so ist die Prüfung an Proben vorzunehmen, deren Herstellung

<sup>1</sup> Vgl. WURZSCHMITT, B. u. F. W. KERKOW: Z. anal. Chem. Bd. 108 (1937) S. 247.

<sup>2</sup> NOWAK, P. u. H. HOFMEIER: Kunststoffe Bd. 27 (1937) S. 184.

der Kabelmantel-Herstellung entspricht, also hauptsächlich an schlauchförmigen Proben.

Von W. SCHRÖDER<sup>1</sup> ist eine geeignete Versuchsanordnung entwickelt worden. Ein vollkommen getrockneter Luftstrom durchströmt den zu untersuchenden Kunststoffschlauch, der sich in Wasser oder Wasserdampf befindet. Der Luftstrom nimmt das diffundierte Wasser mit und gibt es in 2 Trockenröhren ab, die mit Phosphorpentoxyd gefüllt sind. Diese Röhren werden nach bestimmten Zeitabschnitten gewogen. Nach kurzer Zeit bereits stellt sich das Gleichgewicht ein; der Schlauch hat sich mit Wasser gesättigt. Jede Spur von Wasser, die in das Innere des

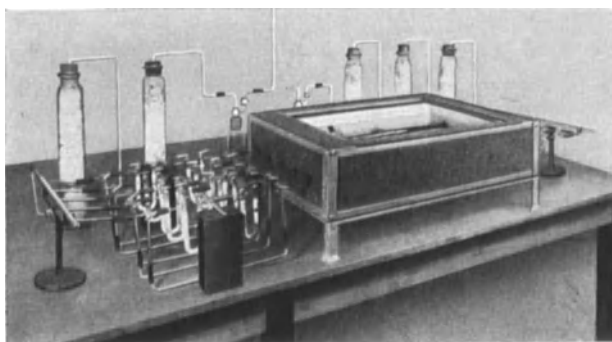


Abb. 181. Gerät zur Messung der Wasserdampfdurchlässigkeit an Schläuchen nach SCHRÖDER.

Mantels durchdringt, wird sofort von dem trocknen Luftstrom mitgenommen, so daß im Mantel praktisch der Dampfdruck Null herrscht, während draußen der Wasserdampfdruck von der herrschenden Temperatur abhängig ist; er kann aus Tabellen entnommen werden. Um möglichst stets die gleiche Wassertemperatur, d. h. stets den gleichen Wasserdampfdruck zu haben, ist das ganze Gefäß gut isoliert. Sobald das Gleichgewicht erreicht ist, erhält man für gleiche Zeiträume gleiche Gewichtszunahmen der Absorptionsröhrchen. Die Diffusionskonstante läßt sich dann nach dem Fickschen Gesetz errechnen.

Abb. 181 zeigt eine geeignete Apparatur zur gleichzeitigen Prüfung von 5 Schläuchen. Um die Luft, die durch die Schläuche hindurchströmt, gleichmäßig verteilen zu können, ist eine Reihe von Blasenzählern eingebaut. Der Wasserkasten ist gut isoliert, außerdem ist er heizbar; es lassen sich also in ihm auch Untersuchungen bei erhöhten Temperaturen durchführen. Untersuchungen bei erhöhten Temperaturen sind aber im allgemeinen nicht erforderlich, da die Diffusionskonstante innerhalb des für die Kabel- und Leitungsindustrie in Frage kommenden

<sup>1</sup> SCHRÖDER, W.: Kunststoffe Bd. 29 (1939) S. 44.

Temperaturbereichs bei den meisten Kunststoffen praktisch temperaturunabhängig ist.

### γ) Verhalten gegen kochendes Wasser.

Das Verhalten gegen kochendes Wasser dient meist nicht zur Beurteilung der Wasserwirkung, sondern hauptsächlich zur Feststellung von Herstellungsfehlern bei *Kunstharz-Preßstoffen* aus härtbaren Phenol- oder Harnstoffharzen.

Die Prüfung, die als **Kochprüfung** bekannt ist, wird in Anbetracht ihrer leichten Ausführbarkeit und vielseitigen Anwendbarkeit häufig angewandt.

Die Proben, deren Gestalt beliebig sein kann, werden 15 min lang (zweckmäßig länger, möglichst 30 min) in kochendes Wasser gelegt und danach auf Änderung des Aussehens geprüft. Gut ausgehärtete Preßteile dürfen keine Veränderung der Oberfläche zeigen (Blasen, Runzeligwerden, Glanzeinbuße) (Abb. 176 b, S. 264).

Die Prüfung ist recht aufschlußreich bei Harnstoffharz-Preßstoffen (Typ K), da sie auch Fehler in der Werkzeugbeheizung aufdeckt. So werden nur diejenigen Zonen von Preßteilen, die ungenügend beheizt waren, stumpf oder blasig, während die übrige Preßteilerfläche einwandfrei bleibt (vgl. Abb. 6 auf S. 32). Bei Preßteilen aus Typ S ist die Kochprüfung nur bei groben Herstellungsfehlern zuverlässig. Eine weitere Ausgestaltung kann die Prüfung erfahren durch

Verlängerung der Prüfzeit bis zu 1 h,

Bestimmung der Wasseraufnahme,

Bestimmung von wasserlöslichen Anteilen, freien Phenolen, Ammoniak usw.

### c) Beständigkeit gegen Chemikalien.

Neben der im vorstehenden Abschnitt gesondert behandelten Wirkung von Wasser kommt in einigen Fällen in der Elektrotechnik auch die Wirkung anderer Chemikalien in Betracht. Am häufigsten sind Einwirkungen von Mineralölen, Säuren, Laugen und Salzen.

Die Beständigkeit gegenüber Mineralöl wird am zweckmäßigsten durch mechanische Prüfungen vor und nach Lagerung ermittelt, während zur *raschen* Feststellung der Beständigkeit gegenüber Säuren und Laugen die Messung des Oberflächenwiderstandes vor und nach Lagerung herangezogen wird. Im übrigen gelten für die endgültige spätere Ausgestaltung der Prüfverfahren die gleichen Forderungen, wie sie bereits in den vorstehenden Abschnitten a und b (S. 263 bis 266) erhoben wurden.

In den deutschen Vorschriften für *Isolierstoffe* VDE 0302 hat man von den verschiedenen Chemikalien bisher berücksichtigt: Neben *Wasser* (s. S. 268) *verdünnte Schwefelsäure*, wie sie sich in Akkumulatorenräumen durch das Gasen der Zellen beim Laden überall hin verbreitet, und *Ammo-*

*niakdampf*, der in Viehställen, Aborten u. ä. auftritt. Als Kennzeichen für die Wirkung wird der Oberflächenwiderstand gemessen vor und nach 24stündiger Einwirkung von *Wasser*,

3wöchiger Einwirkung von 25%iger *Schwefelsäure*,

3wöchiger Einwirkung von *Ammoniakdampf*,

wobei als Proben je 3 Normalstäbe ( $10 \times 15 \times 120$  mm<sup>3</sup>) verwendet werden. Nach der Lagerung in Schwefelsäure werden die Proben 1 min in fließendem Wasser gespült, dann — wie nach der 24stündigen Lagerung in Wasser — senkrecht bei Raumtemperatur 2 h in ruhender Luft stehen gelassen und gemessen. Zur Prüfung in Ammoniak werden die Proben in großen Glasgefäßen aufgehängt, auf deren Boden sich eine gesättigte, wäßrige Ammoniaklösung befindet. Die Gefäße werden mit Glasplatten abgedeckt. Von 3 zu 3 Tagen wird Ammoniak zugefüllt, um Verluste an Ammoniakdampf zu ersetzen. Nach der Lagerung werden die Proben mit einem trocknen Tuch abgerieben und auf Aussehen und Oberflächenwiderstand geprüft.

Versuche nach Art dieser VDE-Prüfungen können naturgemäß nur ein rohes Bild über die chemische Beständigkeit der Isolierstoffe geben und gelten — streng genommen — nur für die beim Versuch vorliegenden Bedingungen; denn die chemische Beständigkeit ist weitgehend abhängig von der Art und Konzentration der einwirkenden Stoffe, von der Zeit, Temperatur, dem Druck usw. Dabei ist zu beachten, daß die *Chemikalien* entweder als Lösungsmittel oder als Reaktionspartner bei chemischen Umsetzungen mit dem Isolierstoff wirken können. Bei organischen Kunststoffen wird man bei Kenntnis der Zusammensetzung vielfach ohne Prüfung die chemische Beständigkeit ungefähr voraussagen können.

So haben z. B. Lösungsmittel aus der Klasse der Alkohole in der Regel kein Lösevermögen für nichthärtbare Kunststoffe auf Kohlenwasserstoffbasis (Polystyrol, Polyisobutylene), auf Vinylchloridbasis, auf Esterbasis (Polyakrylsäure- und Polymethakrylsäureester) und für Polyvinylkarbazole. Eine gewisse Ausnahme machen die Polyvinylazetate, die vor allem in den niederen Alkoholen löslich sind. Ester und Ketone sowie verschiedene Ester-Mischlösungsmittel zeigen im allgemeinen stark lösende Wirkung, jedoch nicht für Polyisobutylene und Polyvinylkarbazole, die entweder unlöslich oder nur quellbar sind. Benzolkohlenwasserstoffe und Chlorkohlenwasserstoffe lösen die meisten nichthärtbaren Kunststoffe gut, eine schlechte Lösewirkung zeigen sie bei chlorhaltigen Polymerisaten. Gegen Benzinkohlenwasserstoffe und hydroaromatische Kohlenwasserstoffe sind die nichthärtbaren Stoffe mit Ausnahme der auf Kohlenwasserstoffbasis aufgebauten beständig.

Gegen die Einwirkung stark reaktionsfähiger chemischer Substanzen sind die nichthärtbaren Kunststoffe überraschend widerstandsfähig. Das gilt besonders für die Stoffe auf Kohlenwasserstoff- und Vinylchloridbasis. Die Beständigkeit erstreckt sich sowohl auf Säuren und Alkalien als auch

auf Oxydations- und Reduktionsmittel. Nur wenige Chemikalien von allgemeinerer Bedeutung wirken auf diese Stoffe ein, so Chlor und konzentrierte Salpetersäure, aber auch gegen sie sind verschiedene Kunststoffe ausgezeichnet beständig. Bei manchen an sich nicht beständigen Kunststoffen, wie Polyvinylchlorid gegenüber Chlor, kommt eine Schutzschicht an der Oberfläche zur Ausbildung, die einen weiteren Angriff verhindert. Bei Kombination mit Weichmachungsmitteln oder anderen Zusatzmitteln müssen die jeweils verwendeten Mittel mitberücksichtigt werden.

In den amerikanischen Vorschriften hat man erheblich mehr Chemikalien zur Prüfung vorgesehen als in Deutschland.

Das Verfahren der A.S.T.M., das zunächst versuchsweise seit Juni 1939 in Kraft ist, erstreckt sich auf die Prüfung aller *organischen Kunststoffe* und benutzt als Kennzeichen für die chemische Wirkung lediglich Änderungen von Maß, Gewicht und Aussehen. Unterschieden wird zwischen „Standard-Reagenzien“ und „zusätzlichen Reagenzien“.

Zu den ersten gehören:

- 30%ige *Schwefelsäure* [199 cm<sup>3</sup> (366 g) H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (*D* = 1,84) zu 853 cm<sup>3</sup> Wasser langsam hinzufügen],
- 3%ige *Schwefelsäure* [16,6 cm<sup>3</sup> (30,6 g) H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (*D* = 1,84) zu 988 cm<sup>3</sup> Wasser langsam hinzufügen],
- 10%ige *Natriumhydroxyd*-Lösung (111 g NaOH in 998 cm<sup>3</sup> Wasser lösen),
- 1%ige *Natriumhydroxyd*-Lösung (10,1 g NaOH in 999 cm<sup>3</sup> Wasser lösen),
- 95%iger *reiner Äthylalkohol*,
- 50%iger *Äthylalkohol* [598 cm<sup>3</sup> (482 g) 95%igen Äthylalkohol zu 434 cm<sup>3</sup> Wasser hinzufügen],
- Azeton*,
- Äthylazetat* (85 bis 88 % Estergehalt),
- Äthylendichlorid*,
- Kohlenstoff-Tetrachlorid*,
- Toluol*
- Benzin* (ohne schwere Kohlenwasserstoffe und Benzol),
- 10%ige *Natriumchlorid*-Lösung (107 g NaCl in 964 cm<sup>3</sup> Wasser lösen),
- 10%iges *destilliertes Wasser* (frisch zu bereiten).

Als zusätzliche Reagenzien werden aufgeführt:

- 10%ige *Salpetersäure* [108 mg (153 g) HNO<sub>3</sub> (*D* = 1,42) zu 901 cm<sup>3</sup> Wasser hinzufügen],
- 10%ige *Salzsäure* [239 mg (283 g) HCl (*D* = 1,19) zu 764 cm<sup>3</sup> Wasser hinzufügen],
- 5%ige *Essigsäure* [48 cm<sup>3</sup> (50,5 g) Eisessig (*D* = 1,05) zu 955 cm<sup>3</sup> Wasser hinzufügen],
- Ölsäure*,
- 10%iges *Ammonium-Hydroxyd* („Ammoniak“) [375 cm<sup>3</sup> (336 g) NH<sub>4</sub>OH (*D* = 0,90) zu 622 cm<sup>3</sup> Wasser hinzufügen],
- 2%ige *Natriumkarbonat*-Lösung („Soda“) [55 g Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> · 10 H<sub>2</sub>O in 964 cm<sup>3</sup> Wasser lösen],
- 3%ige *Wasserstoffperoxyd*-Lösung [99 cm<sup>3</sup> (108 g) handelsübliches 28%iges Wasserstoffperoxyd zu 901 cm<sup>3</sup> Wasser hinzufügen].

Als Probekörper sollen für formgepreßte Kunststoffe Scheiben (50,8 mm Dmr., 3,2 mm Dicke, 45,5 cm<sup>2</sup> Oberfläche) verwendet werden, sofern mit anderen organischen Kunststoffen verglichen werden soll.

Für schicht- oder plattenförmige Kunststoffe sind  $76,2 \times 25,4$  mm<sup>2</sup> große Stäbe von Plattendicke zu verwenden; für Vergleiche mit anderen Kunststoffen sollen die Stäbe  $3,2 \text{ mm} \pm 0,02 \text{ mm}$  dick sein, so daß die Oberfläche  $45,1 \text{ cm}^2$  beträgt.

Vor der Lagerung werden für jedes Reagens 3 Proben im Anlieferungszustand gewogen und Durchmesser bzw. Länge und Dicke auf  $0,02 \text{ mm}$  genau gemessen. Zur Lagerung sollen alle Standard-Reagenzien und einige der zusätzlichen Reagenzien verwendet werden. Gelagert wird 7 Tage bei 25 bis  $30^\circ \text{ C}$ , wobei die Proben allseitig dem Reagens ausgesetzt

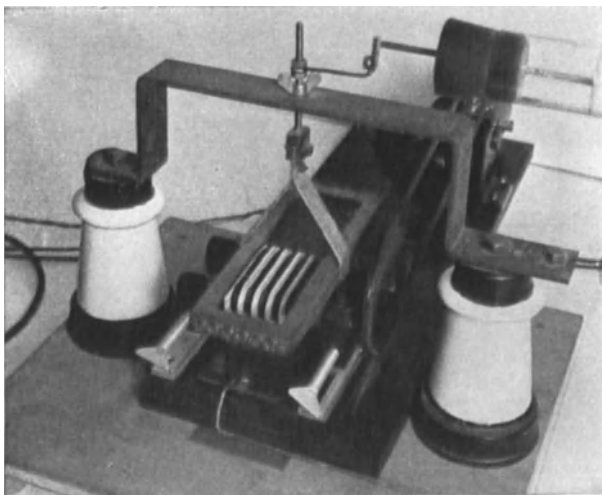


Abb. 182. Gerät zur Bestimmung der Ozonbeständigkeit von Gummi.

sein müssen. Für jede Probe sind mindestens  $50 \text{ cm}^3$  Reagens zu verwenden. Proben, die in Säuren, Alkalien oder Lösungen gelagert wurden, sind anschließend in fließendem Wasser zu waschen, mit einem trocknen Tuch abzuwischen und unverzüglich zu wiegen und zu messen. Proben, die in Lösungsmitteln gelagert wurden, werden nur mit einem trocknen Tuch abgewischt und sofort gewogen und gemessen.

Im Prüfungsbericht sind unter anderem anzugeben: Gewichtszunahme oder -abnahme nach 7 Tagen in Prozenten (auf  $0,01\%$  genau), Maßänderungen (Durchmesser bzw. Länge und Dicke) in Prozenten, allgemeiner Zustand nach der Lagerung (Aussehen).

Die französischen Vorschriften für *Isolierpreßstoffe* (U.S.E. 1937/38–46) schreiben zur Prüfung auf *Verhalten gegen Mineralöl* (Tenue dans l'huile minérale) als Probekörper Platten,  $3 \times 100 \times 100 \text{ mm}^3$ , oder Scheiben,  $3 \pm 0,25 \text{ mm}$  dick,  $100 \text{ mm}$  Dmr., vor.

Von 4 Proben werden 2 ungeteilt, 2 geteilt (halbiert; Schnittlänge 100 mm) geprüft. Nach 8stündiger Lagerung bei 15 bis 25° über Chlorcalcium werden die Proben 8 h in Transformatorenöl, das den französischen Vorschriften (U.S.E. 1937/38—136) entspricht, bei  $100 \pm 5^\circ$  gelagert.

Festgestellt werden nach der Lagerung Änderung des Aussehens, Erweichen, Lösen, Quellung, Ölverfärbung usw.

Ein Sonderfall wird in den französischen Vorschriften, U.S.E. 1937/38—27, für *Isolierlacke* behandelt, und zwar der Angriff von *Isolierlack auf Kupfer*.

Zur Beurteilung der *Wirkung auf Kupfer* werden gut entfettete und polierte Kupferstreifen in den Lack getaucht und herausgezogen; nach dem Abtropfen wird eine der Schnittflächen der Streifen sorgfältig ab-

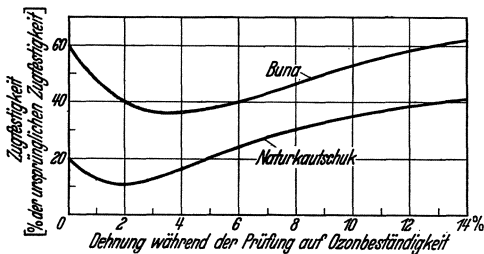


Abb. 183. Verlauf der Zugfestigkeit in Abhängigkeit von der Dehnung bei Ozonbeanspruchung.

gewischt, um das Kupfer freizulegen. Die Streifen werden dann 8 Tage bei 100° gelagert und danach auf Grünfärbung des Kupfers beobachtet; bei auftretender Grünfärbung soll das die Färbung verursachende Salz auf Isolationsvermögen untersucht werden.

Die bisher behandelten Verfahren erstrecken sich auf

die chemische Wechselwirkung zwischen *festen* und *flüssigen* Stoffen. Zur Beurteilung der Beständigkeit von Isolierstoffen gegenüber *Gasen* ist von H. ROELIG ein Verfahren angegeben worden, und zwar zur Beurteilung der *Ozonbeständigkeit von Gummi*<sup>1</sup>.

Die „*Corona- oder Ozonbeständigkeit*“ von Weichgummimischungen, einschließlich solcher aus Kunstkautschuk, interessiert für die Gummiisolierung von Hochspannungsleitern, wie Röntgenkabeln, Zündkabeln und Neonleitungen. Da die Abnahme der mechanischen und elektrischen Festigkeit einer Mischung von der mechanischen Belastung abhängt, bei der der Ozonangriff erfolgt, wurden Gummi-Normringe R.I (Abb. 114, S. 183) über langsam rotierende Walzen gelegt, deren Abstand entsprechend der gewünschten mechanischen Vorspannung (Dehnung) geändert werden konnte, und gleichzeitig der Wirkung der Hochspannung ausgesetzt, die zwischen einem System feiner Drähte und einer geerdeten Platte zum Koronaeffekt und damit zur Ozonbildung führte (Abb. 182). Nach einer bestimmten Zeit (1 h bei 10000 V) werden die Ringe zerrissen und der Verlust an Zugfestigkeit in Prozenten der ursprünglichen Zugfestigkeit im unbeanspruchten Zustand festgestellt und über der mechanischen Dehnung, die während des Vorganges herrschte, aufgetragen. Man erhält so eine Kurve (Abb. 183), die für eine bestimmte mechanische

<sup>1</sup> ROELIG, H.: Z. Kautschuk Bd. 13 (1937) S. 158.



Dehnung ein Minimum der Zugfestigkeit und damit den ungünstigsten Wert zeigt, der als Kennziffer für die Ozonbeständigkeit gelten kann.

#### d) Wetterfestigkeit.

So wichtig die *Wetterfestigkeit*, d. h. das Verhalten im Wetter, für viele Anwendungsgebiete der Isolierstoffe ist, so schwierig ist die zahlenmäßige Erfassung mittels eines Prüfverfahrens. Dazu gehört auch das Verhalten im tropischen Klima, kurz als „*Tropenfestigkeit*“ bezeichnet. Einer der Hauptgründe für diese Schwierigkeit ist die Tatsache, daß das „Wetter“ keine fest umrissene Beanspruchung ist. Weder Freilagerversuche noch Kurzprüfungen, die das „Wetter“ nachzuahmen versuchen, können die Wetterfestigkeit ausreichend erfassen; denn die durch das Wetter auftretenden möglichen Beanspruchungen durch Wasserdampf (Luftfeuchtigkeit), Wasser (Tau, Regen), Eis und Schnee, Wärme, Kälte, Sonnenschein sind vom Klima des Landes und im gleichen Land von der Dauer und Häufigkeit des Wechsels der klimatischen Einflüsse abhängig.

Um ein allgemeines Urteil über Wetterfestigkeit abgeben zu können, ist unter anderem notwendig: Kenntnis der möglichen klimatischen Einflüsse, des chemischen Aufbaues und der Zusammensetzung des Isolierstoffes, seines Verhaltens gegenüber Wasser, Wärme, Kälte, Licht<sup>1</sup>.

Ein Prüfverfahren zur Beurteilung der „Wetterfestigkeit“ findet sich bisher in keiner Prüfvorschrift für Isolierstoffe.

#### e) Alterung.

Stoffe „altern“, d. h. sie können unter dem Einfluß „normaler“ Lagerungsbedingungen (normaler Luftfeuchtigkeit, -temperatur und Licht) chemische Umsetzungen und physikalisch-chemische Änderungen erleiden, die ihre ursprünglichen Eigenschaften so ändern können, daß sie als Isolierstoff unbrauchbar werden. „Nichtalternde“ Isolierstoffe sind daher „haltbar“, während leicht zur Alterung neigende Stoffe mangelhafte Haltbarkeit aufweisen.

Es ist also verständlich, daß man seit langem bestrebt war, für leicht alternde Stoffe Prüfverfahren aufzustellen, die die Alterung zahlenmäßig zu erfassen gestatten. Die Art des Prüfverfahrens muß sich dabei naturgemäß nach der Art des Stoffes richten. Man kann nicht *ein* für alle Stoffe gültiges Verfahren anwenden, sondern man muß der chemischen Natur des Stoffes und den dadurch bedingten Alterungsvorgängen gerecht werden.

Am bekanntesten und eingehendsten untersucht wurden bisher die Alterungsvorgänge beim *Gummi*, d. h. also beim *vulkanisierten Naturkautschuk* und dessen Mischungen. Für die Prüfmethodik gilt auch heute noch das von MEMMLER und SCHOB Gesagte<sup>2</sup>: „Es liegt auf der Hand, daß

<sup>1</sup> Vgl. u. a. NITSCHKE, R. u. E. SALEWSKI: Kunststoff-Techn. u. Kunststoff-Anw. Bd. 9 (1939) S. 416.

<sup>2</sup> MEMMLER: Handbuch der Kautschukwissenschaft, S. 692. Leipzig: S. Hirzel 1930.

man von jeher bestrebt sein mußte, durch irgendein Prüfverfahren sich in möglichst kurzer Zeit darüber zu vergewissern, ob ein Gegenstand aus Weichgummi eine genügend lange Lebensdauer aufweisen würde; denn die Erfahrung hatte gelehrt, daß einige Zeit nach der Vulkanisation festgestellte gute Eigenschaften einer Mischung noch keinerlei Gewähr dafür bieten, daß diese Eigenschaften auch für längere Zeit (Jahre) bestehen bleiben. Da auch aus der Zusammensetzung der verwendeten Mischung keine oder höchstens nur ganz ungefähre Anhaltspunkte zur Beurteilung der Widerstandsfähigkeit einer Weichgummisorte gegen Altern gewonnen werden konnten, so hat man Verfahren ausgearbeitet, die eine „künstliche Alterung“ in kurzer Zeit bewirken, in der Erwartung, daß eine solche künstliche Alterung proportional verkürzt den natürlichen Alterungsvorgang widerspiegelt.

Man hat die für die natürliche Alterung maßgeblichen Faktoren wie *Sauerstoff*, *Licht* und *Wärme*, teils einzeln, teils kombiniert mit Intensitäten, die ein Vielfaches der natürlichen Intensitäten sind, auf Kautschuk einwirken lassen. Man erwartete hierbei, daß ein für die verschiedensten Gummierzeugnisse gleich großer Umrechnungsfaktor besteht, der aus den Veränderungen, die durch künstliche Alterung hervorgerufen wurden, eine Prognose für das natürliche Altern zu stellen gestattet, also beispielsweise 1 Tag künstliche Alterung = 1 Monat natürliche Alterung.

Sobald ein neues Verfahren der künstlichen Alterung, die bisher in der überwiegenden Mehrzahl der Fälle aus einer Kombination und Variation der obenerwähnten 3 Faktoren besteht (gelegentlich auch Anwendung elektrischer Entladungen), auftaucht, werden gewöhnlich mit großer Bestimmtheit solche Umrechnungsfaktoren genannt. Ist dann erst eine größere Zahl von Mischungen untersucht, so wird man regelmäßig bescheidener. Abgesehen von der grundsätzlich falschen Einstellung zur Frage der künstlichen Alterung, wurden häufig auch noch sehr elementare Fehler gemacht, indem man z. B. behauptete, die Wirkung des Quecksilberdampflichtes sei gleich der des Sönnenlichtes, nur verstärkt (man überschätzte hierbei einseitig die Wirkung der kurzwelligen Strahlen)“.

Von den vielen vorgeschlagenen Verfahren haben sich in Deutschland nur zwei für *Weichgummi* durchgesetzt, die im Normblatt DIN DVM 3508 verankert wurden. Danach werden Zugfestigkeit und Dehnung vor und nach einer „künstlichen Alterung“ bestimmt; die Änderung der Eigenschaften ermöglicht die vergleichende Beurteilung verschiedener Weichgummisorten in bezug auf die Lebensdauer, läßt aber keine zahlenmäßige Angabe der Lebensdauer zu. Die künstliche Alterung kann erfolgen entweder

1. durch Lagern in bewegter Luft bei  $70 \pm 1^\circ$  (Wärmeschrank nach GEER) für die Dauer von 7 Tagen oder ein Vielfaches von 7 Tagen oder
2. durch Lagern in Sauerstoff von  $20 \pm 0,5$  atü bei  $60 \pm 1^\circ$  für die Dauer von 48 h oder ein Vielfaches von 48 h.

Diese Verfahren werden nur dann mit einigem Erfolg auf andere Isolierstoffe anwendbar sein, wenn die Alterung, wie bei Gummi, hauptsächlich auf Oxydation zurückzuführen ist. Ist dies nicht der Fall, so muß die künstliche Alterung der chemischen Natur des Stoffes angepaßt werden. Ausgearbeitete und anerkannte Verfahren für *organische Kunststoffe* liegen bisher in Deutschland noch nicht vor<sup>1</sup>.

Die französischen Vorschriften (U.S.E. 1937/38—27) enthalten Verfahren für *Isolierlacke*.

Zur Beurteilung der *Alterung* bei ofentrocknenden Lacken wird auf einem Reagensglas durch Eintauchen des Glases in den Lack ein dünner Lackfilm gebildet. Der Film auf dem Glas wird bei 110° 21 Tage im Dunkeln gelagert. Nach der Lagerung muß sich mittels eines scharfen Messers ein dünner elastischer Span vom Film abschneiden lassen, sofern der Lack alterungsbeständig ist. Die 21tägige Lagerung ist nur bei neuen ofentrocknenden Lacken notwendig; bei bereits bewährten Lacken genügt nach den französischen Angaben 7tägige Lagerung.

### III. Bewertung.

Bei der Bewertung von Isolierstoffen sind die im Abschnitt II A (S. 14) gemachten Ausführungen zu beachten. Es muß immer wieder betont werden, daß die an Hand von Prüfverfahren ermittelten Eigenschaftszahlen zunächst nur für den zur Prüfung verwendeten Prüfkörper und für die bei der Prüfung herrschenden Bedingungen Gültigkeit haben. Eine Übertragung solcher Ergebnisse auf fast stets andersartig gelagerte Fälle der Praxis ist nur dann zulässig und möglich, wenn der Beurteiler über die notwendigen stoffkundlichen und praktischen Erfahrungen verfügt.

Werkstoffprüfungen, die an Hand der im Abschnitt II beschriebenen Verfahren ausgeführt werden, haben in erster Linie die Aufgabe, das Handwerkszeug zur Beurteilung der *Gleichmäßigkeit* zu sein. Der Wert und die Brauchbarkeit des Isolierstoffes für eine bestimmte praktische Anwendung muß also schon auf Grund jahrelanger praktischer Beobachtung erwiesen sein; die Prüfung soll hauptsächlich feststellen, ob der bewährte Isolierstoff in gleichgebliebener Beschaffenheit vorliegt. Man muß vor allem sehr vorsichtig sein, wenn man Prüfungsergebnisse, die man an neuen oder unbekanntem Isolierstoffen gewonnen hat, vergleicht mit entsprechenden Ergebnissen an anderen Isolierstoffen, um so den „Wert“ des Stoffes festzustellen. Solche Vergleiche können nur dann gezogen werden, wenn erstens die ermittelten Eigenschaften möglichst zahlreich und vielartig sind, wenn zweitens die Vergleichswerte nach gleichen Prüfverfahren ermittelt wurden und wenn drittens zum Vergleich möglichst ähnliche Stoffe herangezogen werden. Man sei

<sup>1</sup> Vgl. u. a. P. NOWAK u. H. HOFMEIER: Kautschuk Bd. 14 (1938) S. 194.

sich stets bewußt, daß die Werkstoffprüfungen zwar einen Anhalt über die Brauchbarkeit für diesen oder jenen Zweck geben können, daß das letzte und entscheidende Wort aber nur die Praxis über den Wert oder Unwert sprechen kann.

So bleibt als wesentlichste Aufgabe, bei der Bewertung festzustellen, ob der geprüfte Isolierstoff auf Grund seiner Zusammensetzung und einiger charakteristischer Eigenschaften in eine bestimmte Stoffgruppe, in einen bestimmten „Typ“, hineingehört, deren Wert für einen bestimmten Zweck genügend bekannt ist. Man kann dann für den untersuchten Stoff sein praktisches Verhalten meist sicher vorhersagen.

Dieser Weg zur Stoffbewertung ist in klarer und vorbildlicher Weise von der Preßstoffindustrie bei der Schaffung der „Typisierung“ gegangen worden.

## A. Typisierung und Überwachung von Isolierpreßstoffen<sup>1</sup>.

### 1. Grundsätze der Typisierung.

Bei der verhältnismäßig noch jungen Industrie der Isolierpreßstoffe war es möglich, frühzeitig Fehlschläge mannigfaltiger Art hinsichtlich Güte und Bewährung des Werkstoffes dadurch zu verhindern, daß man rechtzeitig wirksame Maßnahmen ergriff. Nach Festlegung von Prüfverfahren wurden die zahlreichen Isolierpreßstoffe 1924 klassifiziert: Die Stoffe wurden — ohne Rücksicht auf die chemische Zusammensetzung — in 10 Güteklassen eingeordnet, die durch Mindestwerte für Biege- und Wärmefestigkeit gekennzeichnet waren. Die schnelle Entwicklung der Preßstoffe und die unzureichende Stoffkennzeichnung durch die Klassifizierung bedingten schon 1928 eine Änderung durch „Typisierung“, bei der die Stoffe nach ihrer stofflichen Zusammensetzung *und* einigen besonders charakteristischen Eigenschaften eingeordnet werden. Den jetzigen Stand der Typisierung zeigt die Tabelle 26. Um die Klassifizierung, später die Typisierung, zur vollen Geltung und durchgreifenden Wirkung zu bringen, ließ ein Teil der Preßstoffindustrie seit 1924 ihre Preßstoffe seitens des Staatlichen Materialprüfungsamtes Berlin-Dahlem klassifizieren bzw. typisieren und laufend überwachen. Die bisherige Entwicklung der Typen geht aus den Abb. 184 und 185 hervor. Die Darstellung hat die amtlichen „Bekanntmachungen über typisierte und überwachte Preßstoffe“ als Grundlage<sup>2</sup>. Zwar sind die Zahlen der überwachten Preßstoffe nicht identisch mit den verarbeiteten Mengen, doch geben sie ein anschauliches Bild über das wachsende oder abnehmende Interesse, das die einzelnen Typen im Laufe der Zeit gefunden haben.

<sup>1</sup> Die Ausführungen erstrecken sich ausschließlich auf gummifreie, nicht-keramische Isolierpreßstoffe.

<sup>2</sup> Vgl. z. B. letzte Bekanntmachung in der ETZ Bd. 61 (1940) Heft 11, S. 282; Heft 12, 13.

Tabelle 26. Übersicht über die Typisierung der gummifreien Isolierpreßstoffe<sup>1</sup>.

Typ	Zusammensetzung	Mechanische Eigenschaften			Thermische Eigenschaften		Elektrische Eigenschaften	Verarbeitungsart
		Biegefestigkeit	Schlagbiegefestigkeit	Kerbzähigkeit	Wärme- festigkeit nach MARTENS	Glut- festigkeit	Oberflächen- widerstand nach 24stündigem Liegen in Wasser	
		mind. kg/cm <sup>2</sup>	mind. cmkg/cm <sup>2</sup>	mind. cmkg/cm <sup>2</sup>	mind. °C	mind. Gütegrad	mind. Vergleichszahl	
11	Phenolharz mit anorganischem Füllstoff	500	3,5	1,0	150	4	8	Warm- pressung
12		500	3,5	2,0				
M		700	15,0	15,0				
O	Phenolharz mit Holzmehl als Füll- stoff	600	5,0	2,0	100	2	8	Warm- pressung
S		700	6,0	1,5	125	3		
T1	Phenolharz mit Textilfaser als Füllstoff	600	6,0	6,0	125	2	8	Warm- pressung
T2		600	12,0	12,0				
T3		800	25,0	—				
Z1	Phenolharz mit Zellstoff als Füllstoff	600	5,0	3,5	125	3	8	Warm- pressung
Z2		800	8,0	5,5				
Z3		1200	15,0	10,0				
K	Harnstoffharz mit org. Füllstoff	600	5,0	1,2	100	3	10	Warm- pressung
6	Naturharz, natürl. oder künstl. Bitu- men mit anorg. Füllstoff	350	3,5	—	65	2	8	Warm- pressung
7		250	1,5	—		1		
8	Natürl. oder künstl. Bitumen mit anorg. Füllstoff	150	1,0	—	45	3	10	Warm- pressung
A	Azetylzellulose mit oder ohne Füllstoff	300	15,0	—	40	1	8	Warm- pressung
2	Kunsthharz mit As- best und anderem anorg. Füllstoff	350	2,0	—	150	4	8	Kalt- pressung
3	Kunsthharz mit As- best und anderem anorg. Füllstoff	200	1,7	—	150	4	8	Kalt- pressung
4	Natürl. oder künstl. Bitumen mit As- best und anderem anorg. Füllstoff	150	1,2	—	150	4	8	Kalt- pressung
Y	Bleiborat mit Glimmer	1000	5,0	—	400	5	10	Warm- pressung
X	Zement oder Was- serglas mit Asbest und anderem anorg. Füllstoff	150	1,5	—	250	5	—	Kalt- pressung

<sup>1</sup> Vgl. auch ETZ Bd. 58 (1937) S. 1254.

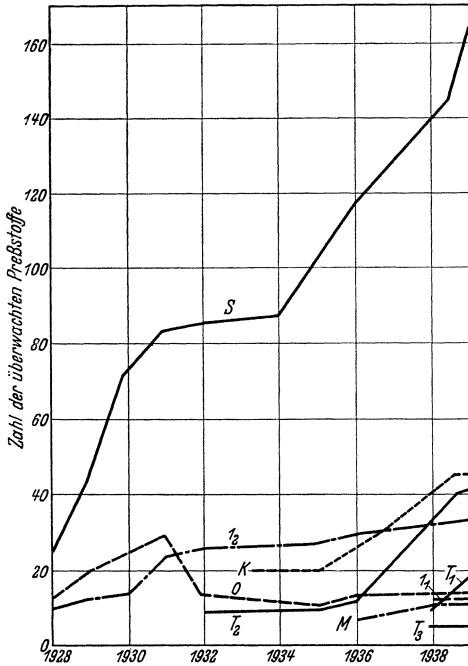


Abb. 184. Entwicklung der überwachten Preßstoffe der Typen 11, 12, M, O, S, T 1, T 2, T 3. (Die Z-Typen sind der besseren Übersicht halber nicht dargestellt; Ende 1938 wurden 12 Sorten des Typs Z 1, 15 des Typs Z 2 und 12 des Typs Z 3 überwacht.)

Typisierung und Überwachung bringen Ordnung und Übersicht über die zahlreichen Isolierpreßstoffe, die für die Elektrotechnik von Bedeutung sind. Die ständige amtliche Überwachung der Isolierpreßstoffe beugt Änderungen der Zusammensetzung und der Eigenschaften vor.

Allgemein soll die Typisierung die Grundlage für eine zweckmäßige laufende Werkstoffprüfung und -abnahme sein. Sie sieht ihr Hauptziel in der Sicherung der gleichbleibenden Güte bewährter Werkstoffe. Diese Forderung erfüllt die Typisierung im Verein mit der amtlichen Überwachung.

Bei der Typisierung hat man sich bewußt darauf beschränkt, nur einige der kennzeichnenden Eigenschaften mit bestimmten Typ-Bezeichnungen zu benennen und die ungefähre Zusammensetzung der Mischung vorzuschreiben. Die Vorschrift der Zusammensetzung hat den Vorteil, daß sie auch eine Reihe von Eigenschaften sicherstellt, die der unmittelbaren Prüfung schwer oder gar nicht zugänglich sind. Für die wesentlichen Eigenschaften, die die Typisierung aufführt, verlangt man Einhaltung von Mindestwerten.

Die Mindestwerte der Typisierung sind so gewählt, daß sie bei sachgemäßer Herstellung des Werkstoffes stets erreicht werden. Zwar ist es möglich, durch sorgfältige Herstellung der

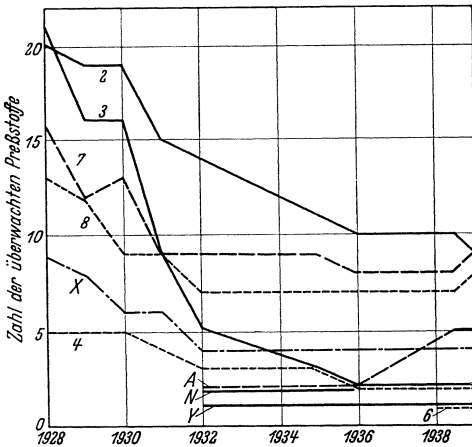


Abb. 185. Entwicklung der überwachten Preßstoffe der Typen 2, 3, 4, 6, 7, 8, A, N (seit 1936 gestrichen), Y, X.

für die Prüfung vorgesehenen Normalkörper hohe Spitzenwerte zu erreichen, die weit über den Mindestwerten liegen. Doch kommt es nicht

darauf an, an besonders hergestellten Normalkörpern solche Spitzenwerte zu erreichen, womit die Prüfung Selbstzweck würde, sondern den Mindestwert bei unvermeidlichen Schwankungen in einem bewährten Werkstoff nicht zu unterschreiten, d. h. mindestens innezuhalten.

Wenn jemand heute einen typisierten Isolierpreßstoff, der nach seinen Eigenschaften und seiner Zusammensetzung z. B. dem „Typ S“ entsprechen soll, bezieht und bei seiner Anwendung gute Erfahrungen macht, so bietet ihm die Typisierung die Gewähr, daß spätere Lieferungen des Preßstoffs Typ S — abgesehen von unvermeidlichen Schwankungen — die gleichen Eigenschaften aufweisen. Die Typisierung erspart mithin dem Verbraucher die Ausführung von umfangreichen und kostspieligen Werkstoff-Kontrollprüfungen.

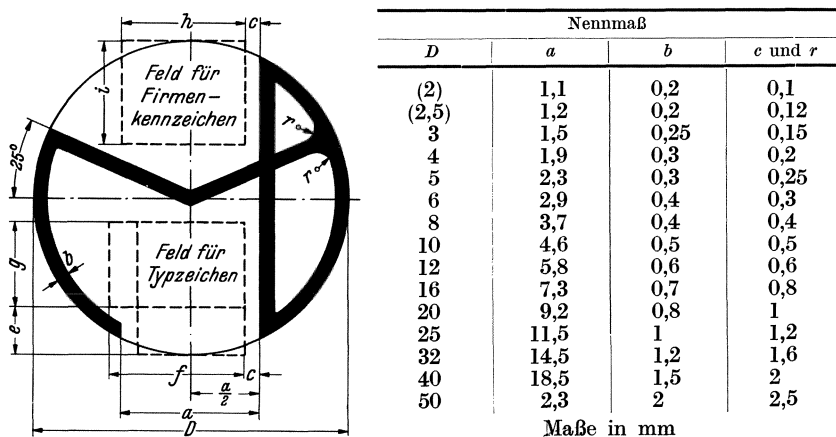


Abb. 186. MPBD-Überwachsungszeichen für typisierte Kunststoffe (Preßmassen und Preßstoffe) nach DIN 7702 (MPBD = Staatliches Materialprüfungsamt Berlin-Dahlem).

(Maße für e, f, g, h, i vgl. Normblatt DIN 7702. Die Maße b bis r sind Richtmaße.)

## 2. Durchführung der amtlichen Überwachung.

Die amtliche Überwachung der typisierten Isolierpreßstoffe, die die Gewähr für die Lieferung eines typgerechten Stoffes bietet, erstreckt sich auf

- A. die fertigen Isolierpreßstoffe in Form von
  - a) besonders angefertigten Normalkörpern und
  - b) Fertigstücken,

B. das Ausgangsmaterial, die Preßmasse, soweit sie zu den härtbaren Kunstharz-Preßmassen oder zu Massen des Typs A gehört und sofern sie von Preßmasse-Herstellern in den Handel gebracht wird.

### A. Überwachung des fertigen Stoffes.

Die Überwachung der fertigen Isolierpreßstoffe wird zur Zeit vom Staatlichen Materialprüfungsamt Berlin-Dahlem bei mehr als

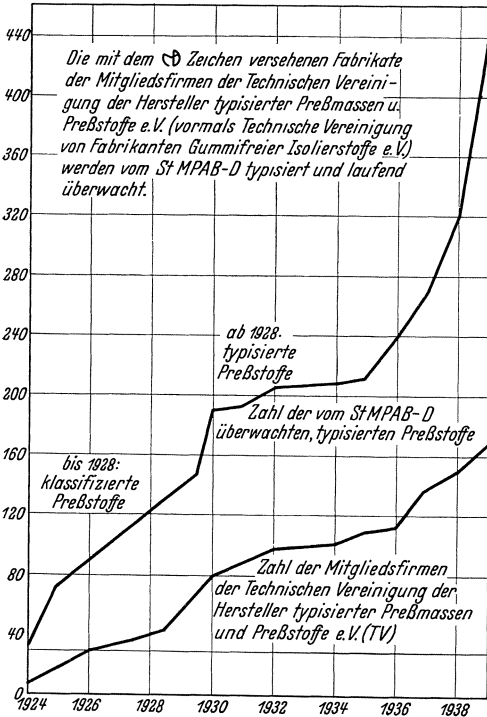


Abb. 187. Zunahme der Mitgliedsfirmen der Technischen Vereinigung und der überwachten und typisierten Preßstoffe.

200 Pressereibetrieben<sup>1</sup> im In- und Ausland durchgeführt (Abb. 187). Diese Betriebe sind Mitglieder der „Technischen Vereinigung der Hersteller typisierter Preßmassen und Preßstoffe e. V.“.

Zwischen dem Staatlichen Materialprüfungsamt Berlin-Dahlem und der Technischen Vereinigung wurde 1924 ein alle Mitglieder der Vereinigung bindender Überwachungsvertrag geschlossen.

Dieser Vertrag berechtigt das Staatliche Materialprüfungsamt Berlin-Dahlem

1. zum Einblick in die die typisierten Preßstoffe betreffende Fabrikation,
2. zur Entnahme und Prüfung von Proben aus Fabrikation, Lager und Kundenkreis,

3. zur Forderung auf Probeneinsendung,

4. zur Nachprüfung der ihm von dritter Seite zur Verfügung gestellten Preßstücke, sofern sie das Überwachungszeichen tragen.

Die Überwachung erstreckt sich auch auf solche Proben, die durch einen Vertreter des Amtes, ohne vorherige Anmeldung, bei den Firmen entnommen werden.

Der Hersteller erhält die Berechtigung zur Führung des MPBD-Überwachungszeichens (MPBD = Staatliches Materialprüfungsamt Berlin-Dahlem) (Abb. 186, 188, 189, 190) für den betreffenden Isolierpreß-

<sup>1</sup> Zusammenstellung der Mitgliedsfirmen und der von ihnen geführten typisierten und überwachten Stoffe u. a. in ETZ Bd. 61 (1940) S. 282 u. 300.



stoff, wenn die Prüfung an Normalkörpern<sup>1, 3</sup> und an Fertigstücken<sup>2, 3</sup> ergeben hat, daß der Stoff den Bedingungen der Typisierung entspricht. Dieses Zeichen muß in das Preßstück eingepreßt werden, und zwar nur in Verbindung mit dem Kennzeichen des Herstellers und außerdem mit der Typ-Bezeichnung des betreffenden Isolierpreßstoffes. Das Überwachungszeichen ist auf den Namen der Technischen Vereinigung beim Reichspatentamt als Warenzeichen eingetragen (Lfd.Nr. 328 532, Kl. 22 b, Akt.-Z. T 14738); seine Ausführung ist im Normblatt DIN 7702 festgelegt.

Die Überwachung trug in Verbindung mit der Typisierung wesentlich zur Bereinigung des

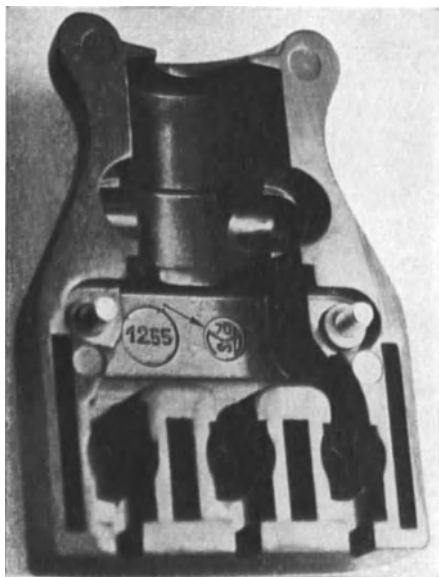


Abb. 188 und 189. Überwachungszeichen in Fertigstücken aus typisierten und überwachten Preßstoffen.

Isolierpreßstoff-Marktes bei. Die zunehmende Beachtung und Schätzung des Überwachungszeichens bei den Verbrauchern ließ die Anzahl der Mitgliedsfirmen der Technischen Vereinigung und der überwachten Preßstoffe im Laufe der Jahre erheblich anwachsen (Abb. 187).

### B. Überwachung des Ausgangsmaterials (Kunsthartz-Preßmassen).

Die Überwachung der fertigen Isolierpreßstoffe mußte im Laufe der Entwicklung notwendig eine Ergänzung erfahren. Während früher die Hersteller von Isolierpreßstoffen die benötigten Preßmassen selbst aus geeigneten Bindemitteln und Füllstoffen anfertigten, wurde mit der zunehmenden Verwendung von härtbaren Kunstharnzen als Bindemittel

<sup>1</sup> Prüfung nach VDE 0320/1936, „Leitsätze für die Prüfung nichtkeramischer, gummfreier Isolierstoffe“.

<sup>2</sup> Vgl. SCHOB, NITSCHKE, SALEWSKI: Die Prüfung von Fertigstücken aus Isolierpreßstoffen auf Werkstoffeigenschaften. Z. Plast. Massen 1935, S. 353; 1936, S. 1.

<sup>3</sup> Die elektrischen Prüfungen werden von der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt, Berlin, ausgeführt.

die Fertigung der Preßmassen mit derartigen Kunstharzen mehr und mehr Aufgabe der Kunstharz-Hersteller, also der chemischen Industrie. Heute beschränkt sich der weitaus größte Teil der Pressereibetriebe darauf, preßfertige Preßmassen von Kunstharz-Betrieben zu beziehen und unverändert zu verarbeiten. Es lag daher nahe, nicht nur die Isolierpreßstoff-Hersteller, sondern auch die Kunstharz-Preßmasse-Hersteller in die Überwachung einzubeziehen. Diese Hersteller sind heute gleichfalls Mitglieder der Technischen Vereinigung und ihre Erzeugnisse unterliegen gleichfalls einer Überwachung.



Abb. 190. Überwachungszeichen auf der Verpackung typisierter und überwachter Kunstharz-Preßmassen.

Die Prüfung wird im Rahmen des Überwachungsvertrages nicht unmittelbar an den Kunstharz-Preßmassen, sondern wieder an Normalkörpern, die aus den betreffenden Massen hergestellt werden, ausgeführt.

Typgerechte und überwachte Kunstharz-Preßmassen, die von den Herstellern in den Handel gebracht werden, tragen auf den Verpackungen ein Schild mit Angabe des Herstellers und der Aufschrift:

„Typisiert und überwacht  
vom Staatlichen Materialprüfungsamt  
Berlin-Dahlem“

nebst aufgedrucktem Überwachungszeichen, das wieder ein Firmen-Kennzeichen und die Typangabe trägt (Abb. 190).

### 3. Verbindung zwischen Stoff- und Masse-Überwachung.

Pressereibetriebe, die ihre Isolierpreßstoffteile mit Überwachungszeichen versehen und selbst keine Kunstharz-Preßmassen herstellen, müssen vertraglich zur Herstellung dieser Preßteile ausschließlich typisierte und überwachte Kunstharz-Preßmassen beziehen und verwenden. So ist eine doppelte Sicherheit für die gleichmäßige Güte typisierter Isolierpreßstoffe gegeben. Außerdem ist es dem Staatlichen Materialprüfungsamt Berlin-Dahlem ermöglicht, bei Beanstandungen, die auf die verwendete Kunstharz-Preßmasse zurückzuführen sind, den Masse-Hersteller zur Verantwortung zu ziehen.

### 4. Anwendung und Wirkung der Überwachung.

Die Einführung von Typisierung und Überwachung elektrotechnischer Bedarfsartikel führte in wenigen Jahren zu klaren, übersichtlichen Verhältnissen,

bei richtiger Auswahl eines typgerechten Stoffes für irgendeinen Anwendungszweck zur Erhöhung der Betriebssicherheit und

auch zur Förderung der Anwendung typisierter und überwachter Isolierpreßstoffe für Artikel, die noch anderen Zwecken als denen der Elektrotechnik dienen.

Während das Überwachungszeichen früher als Stoffgütezeichen nur bei Isolierpreßteilen für elektrische Anwendungsgebiete gefordert wurde — so vor allem vom Reichspost-Zentralamt und für Installationsmaterial vom Verband Deutscher Elektrotechniker —, wird es jetzt auch von anderen Behörden und von privaten Verbrauchern in zunehmendem Maße auch für Preßteile nichtelektrotechnischer Art vorgeschrieben.

## **B. Weitere Grundlagen für die Abnahme von Isolierstoffen.**

Die Typisierung erfaßt bisher nur die in Tabelle 26 aufgeführten Isolierstoffe. Nur für diese Stoffe ist eine in Verbindung mit der amtlichen Überwachung sehr wirksame Abnahmegrundlage vorhanden.

Für viele der übrigen Stoffe hat der Verband Deutscher Elektrotechniker ähnliche Grundlagen in Gestalt seiner Leitsätze für Isolierstoffe geschaffen (VDE-Reihe 0300), die zum großen Teil nicht nur Prüfverfahren enthalten, sondern auch für einige Eigenschaften Mindestforderungen festlegen.

Über die Anforderungen, die an die Stoffe zu stellen sind, sind die Ansichten in den einzelnen Ländern sehr verschieden. Daher unterscheiden sich auch die Art der Prüfung und die geforderten Mindestwerte in den einzelnen Ländern und erst allmählich findet hier eine Angleichung statt.

## **C. Eigenschaftstabeln.**

Das Beispiel der Typisierung zeigt zwar einen brauchbaren Weg für die Abnahme von Isolierstoffen, läßt aber nicht erkennen, ob und innerhalb welcher Grenzen ein Isolierstoff für einen bestimmten Zweck geeignet ist.

Um hierfür eine brauchbare Grundlage zu haben, hat man den Weg beschritten, möglichst umfassende Eigenschaftstabeln für die einzelnen Stoffgruppen und Stoffe aufzustellen. Als erste Ansätze hierzu sind die am Schluß gebrachten Eigenschaftstabeln für keramische und organische Isolierstoffe zu betrachten (Tabellen 27 bis 31, 33 bis 37). Vollwertig werden solche Tafeln erst dann sein, wenn sie zuverlässige Angaben über Abhängigkeit von den Herstellungsbedingungen, Gestaltabhängigkeit, Abhängigkeit von den Umweltfaktoren (z. B. von der Temperatur) bringen. In der jetzigen noch nicht vollkommenen Form sind die Tafeln nur bei ausreichender Sachkenntnis für die Bewertung benutzbar.

Tabelle 27. Keramische Isolierstoffe und Isolierpreßstoffe Typ Y und X.

Nr.	Hauptgruppe	Unterteilung	
<i>A. Keramische</i>			
1	I. Dichte Erzeugnisse aus vorwiegend tonsubstanzhaltigen Massen	Hochbrandporzellan	gedreht
2			gepreßt
3		Feinsteinzeuge auch dunkler Färbung	—
4	II. Dichte Erzeugnisse aus vorwiegend magnesiumsilikathaltigen Massen	niedrig gebrannte Massen	—
5		Steatite	normal
6			Sondermassen
7	III. Dichte Erzeugnisse aus Massen mit hohem Gehalt an Titanverbindungen	vorwiegend rutilhaltige Massen	$\epsilon > 50$
8			$\epsilon < 50$
9		magnesiumtitanathaltige Massen	—
10	IV. Erzeugnisse aus tonsubstanzmagnesiumsilikathaltigen Massen	dichte Massen	—
11		nicht vollkommen dichte Massen	—
12	V. Poröse Erzeugnisse aus tonsubstanzhaltigen, zum Teil auch magnesiumsilikathaltigen Massen mit verschiedenen Zusätzen	—	—
<i>B. Isolierpreßstoffe</i>			
13	I. Typ Y, Bleiborat und Glimmer	—	—
14	II. Typ X, Zement oder Wasserglas mit Asbest und anderen anorganischen Füllstoffen	—	—

<sup>1</sup> Angaben des VDEP für unglasierte keramische Isolierstoffe, herausgegeben

Verarbeitungsbedingungen und kennzeichnende Eigenschaften<sup>1</sup>.

Fertigung	Brenntemperatur nach		Kennzeichnende Eigenschaften	Handelsbezeichnungen
	Segekegel SK	°C		

*Isolierstoffe.*

gedreht, gegossen oder stranggepreßt	13—15	1380—1435	ausgeglichene mittlere Eigenschaften	Hartporzellan
feucht gepreßt	13—15	1380—1435		
gepreßt	4a—6a	1160—1200		
gepreßt	5a—6a	1180—1200	gut maßhaltig, mechanisch fest	Steatit
gedreht, gegossen, gepreßt oder stranggepreßt	13—14	1380—1410	kleiner Verlustfaktor gut maßhaltig, mechanisch fest	Frequenta, Calit
	13—14	1380—1410		Frequenta, Callan, Ultracalan
verschieden	11—13	1320—1380	$\epsilon$ groß $\text{tg } \delta$ klein	Kerafar R u. S., Condensa C
	11—13	1320—1380		Condensa N u. F.
	13—15	1380—1435	$\text{tg } \delta$ sehr klein, $\epsilon$ temperaturunabhängig	Tempa
verschieden	13—14	1380—1410	kleine Wärmedehnzahl, große Temperaturwechselbeständigkeit	Sipa, Ardostan
verschieden	11—14	1320—1410		
verschieden	4a—15	1160—1435	große Temperaturwechselbeständigkeit	Ergan

*Typ Y und X.*

gepreßt	—	—	mechanisch sehr fest, sehr große Temperaturwechselbeständigkeit	Mycalex
gepreßt	—	—	bei kurzfristigen Beanspruchungen feuerfest, aber kein eigentlicher Isolierstoff	

von der Wirtschaftsgruppe Keramische Industrie, Berlin W 30, September 1939.

Tabelle 28. Keramische Isolierstoffe Gläser und

Hauptgruppe	Bezeichnung bzw. Untergruppe	Anwendungsgebiete
<i>A. Keramische</i>		
I. Dichte Erzeugnisse aus vorwiegend tonsubstanzhaltigen Massen	Hartporzellan	Hoch- und Niederspannungsisolatoren und Isolierteile
	Feinsteinzeuge, auch dunkler Färbung	Niederspannungsisolatoren und Isolierteile
II. Dichte Erzeugnisse aus vorwiegend magnesiumsilikathaltigen Massen	niedrig gebrannte Massen	Niederspannungsisolierteile
	Steatite	Hoch- und Niederspannungsisolatoren und isolierteile besonders auch für Hochfrequenz
III. Dichte Erzeugnisse aus Massen mit hohem Gehalt an Titanverbindungen	vorwiegend rutilhaltige Massen magnesiumtitanathaltige Massen	Kondensatoren insbesondere für Hochfrequenz
IV. Erzeugnisse aus tonsubstanz-magnesiumsilikathaltigen Massen	dichte Massen	Hochtemperaturwechselbeständige Isolatoren
	nicht vollkommen dichte Massen	Heizleiterträger für Elektrowärmegeräte
V. Poröse Erzeugnisse aus tonsubstanzhaltigen zum Teil auch magnesiumsilikathaltigen Massen mit verschiedenen Zusätzen	poröse Massen	Heizleiterträger für Elektrowärmegeräte
<i>B. Gläser</i>		
I. Gläser mit niedrigem linearen thermischen Ausdehnungskoeffizienten ( $33 - 50 \cdot 10^{-7}$ )	Hartglas	Isolatoren, Isolierteile
II. Gläser mit linearem thermischen Ausdehnungskoeffizienten zwischen $84$ und $100 \cdot 10^{-7}$	Normalglas	u. a. Isolatoren für Kondensatoren (Minoglas)
III. Geschmolzener Quarz	Quarzglas	hochwertige Isolierteile für Kondensatoren
<i>C. Isolierpreßstoff</i>		
I. Typ Y Bleiborat und Glimmer Kriechstromfestigkeit.	Mycalex	elektrotechnische Sonderzwecke

<sup>1</sup> Vgl. Fußnote 1 S. 292.<sup>2</sup> Bei Gleichspannung. Einige Angaben über Werte Die Tabelle 29 befindet sich

Isolierpreßstoff Typ Y. Elektrische Eigenschaften<sup>1</sup>.

Spezi- fischer Widerstand <sup>2</sup> ( $\Omega$ cm)	Durchschlags- festigkeit bei 50 Hz kV/cm	Dielektrizitäts- konstante $\epsilon$ bei		Dielektrischer Verlustfaktor $\text{tg } \delta \times 10^3$ bei			Ober- flächen- widerstand nach VDE- Vorschrift, Vergleichs- zahl
		50 Hz	10 <sup>7</sup> Hz	50 Hz	800 Hz	10 <sup>6</sup> Hz	

*Isolierstoffe*

> 10 <sup>13</sup>	340—380	5,0	6,5	17—25	—	7—12	> 10
	—	—	—	—	—	—	> 10
	—	—	—	—	—	—	> 10
> 10 <sup>13</sup>	30—40	—	—	—	—	—	> 10
	200—300	5,5	6,5	2,5—3,0	—	1,5—2,0	> 10
	350—450	5,6	6,5	1,0—1,5	0,9—1,2	0,3—0,5	> 10
> 10 <sup>13</sup>	150—200	60	80	—	0,5—10	0,3—1,0	> 10
	150—200	40	45	—	0,5—10	0,3—1,0	> 10
	100—200	12	16	—	1,0	0,07—0,08	> 10
> 10 <sup>13</sup>	100—200	5,0	5,5	20	—	4—7	> 10
	—	—	—	—	—	—	8—10
> 10 <sup>13</sup>	—	—	—	—	—	—	8—10

> 10 <sup>13</sup>	370—450	4,9	6,5	—	—	18—75	10—14
> 10 <sup>13</sup>	450	8	10	0,9	—	0,6	—
> 10 <sup>13</sup>	250—400	3,5	3,7	—	—	0,3	> 15

*Typ Y*

> 10 <sup>13</sup>	140	—	7—8	—	6	1,5—3	10—11
--------------------	-----	---	-----	---	---	-------	-------

kriechstromfest.

bei Wechselspannung in Abhängigkeit von der Temperatur s. Tabelle 29 auf S. 312.  
aus satztechnischen Gründen auf S. 312!

Tabelle 30. Keramische Stoffe und Isolierpreßstoffe

Nr.	Hauptgruppe	Unterteilung	
<i>A. Keramische</i>			
1	I. Dichte Erzeugnisse aus vorwiegend tonsubstanzhaltigen Massen	Hochbrandporzellan	gedreht
2			gepreßt
3		Feinsteinzeuge auch dunkler Färbung	—
4	II. Dichte Erzeugnisse aus vorwiegend magnesiumsilikathaltigen Massen	niedrig gebrannte Massen	—
5		Steatite	normal
6			Sondermassen
7	III. Dichte Erzeugnisse aus Massen mit hohem Gehalt an Titanverbindungen	vorwiegend rutilhaltige Massen	$\varepsilon > 50$
8			$\varepsilon < 50$
9		magnesiumtitanathaltige Massen	—
10	IV. Erzeugnisse aus tonsubstanzmagnesiumsilikathaltige Massen	dichte Massen	—
11		nicht vollkommen dichte Massen	—
12	V. Poröse Erzeugnisse aus tonsubstanzhaltigen, zum Teil auch magnesiumsilikathaltigen Massen mit verschiedenen Zusätzen	—	—
<i>B. Isolierpreßstoffe</i>			
13	I. Typ Y, Bleiborat und Glimmer	—	—
14	II. Typ X, Zement oder Wasserglas mit Asbest und anderen anorganischen Füllstoffen	—	—

<sup>1</sup> Vgl. Fußnote 1, S. 292.<sup>2</sup> Glasiert 300—500 kg/cm<sup>2</sup>.<sup>3</sup> Glasiert



Typ Y und X. Mechanische Eigenschaften<sup>1</sup>.

Raumgewicht g/cm <sup>3</sup>	Porosität (max. Wasseraufnahme Gew.-%)	Zugfestigkeit $\sigma_{zB}$ kg/cm <sup>2</sup>	Druckfestigkeit $\sigma_{dB}$ kg/cm <sup>2</sup>	Härte (Ritzhärtenach MOHS) (0—10)	Biegefestigkeit $\sigma_{bB}$ kg/cm <sup>2</sup>	Schlag- biege- festigkeit cmkg/cm <sup>2</sup>
----------------------------------	--	--	--	--	--	---

*Stoffe.*

2,3—2,5	0	250—350 <sup>2</sup>	4000— 4500 <sup>3</sup>	7—8	400— 700 <sup>5</sup>	1,8—2,2
2,3—2,5	0,1—0,5	—	2500— 3500 <sup>4</sup>	7—8	300— 600	1,3—1,6
2,5	0,4—0,8	—	2500— 3500	7—8	400— 700	1,7—2,1
2,8	0,1—0,8	—	8000— 9000	7—8	1000—1200	3—4
2,6—2,8	0	550—850	8500— 9500	7—8	1200—1400	3—5
2,6—2,8	0	550—950	9000—10000	7—8	1400—1600	4—5
3,5—3,9	0	300—800	3000— 9000	7—8	900—1500	2,5—3,3
3,5—3,9	0	300—800	3000— 9000	7—8	900—1500	2,5—3,3
3,1—3,2	0	600—700	5000— 6000	7—8	800—1100	2,6—3,2
2,1—2,2	0	250—350	3000— 5000	7—8	500— 850	1,8—2,2
2,1	1— 5	150—250	3000— 5000	7—8	500— 650	1,8—2,2
1,6—2,5	3—15	90—160	500— 2500	7—8	150— 500	1,8—1,9

*Typ Y und X*

3,3	—	600—700	1200— 3900	3—4	> 1000	> 5,0
—	—	—	—	—	> 150	> 1,5

4500—5500 kg/cm<sup>2</sup>. <sup>4</sup> Glasiert 3000—4000 kg/cm<sup>2</sup>. <sup>5</sup> Glasiert 600—1000 kg/cm<sup>2</sup>.

Tabelle 31. Keramische Isolierstoffe und Isolierpreßstoffe

Nr.	Hauptgruppe	Unterteilung	
<i>A. Keramische</i>			
1	I. Dichte Erzeugnisse aus vorwiegend tonsubstanzhaltigen Massen	Hochbrandporzellan	gedreht
2			gepreßt
3		Feinsteinzeuge auch dunkler Färbung	—
4	II. Dichte Erzeugnisse aus vorwiegend magnesiumsilikathaltigen Massen	niedrig gebrannte Massen	—
5		Steatite	normal
6			Sondermassen
7	III. Dichte Erzeugnisse aus Massen mit hohem Gehalt an Titanverbindungen	vorwiegend rutilhaltige Massen	$\varepsilon > 50$
8			$\varepsilon < 50$
9		magnesiumtitanathaltige Massen	—
10	IV. Erzeugnisse aus tonsubstanzmagnesiumsilikathaltigen Massen	dichte Massen	—
11		nicht vollkommen dichte Massen	—
12	V. Poröse Erzeugnisse aus tonsubstanzhaltigen, zum Teil auch magnesiumsilikathaltigen Massen mit verschiedenen Zusätzen	—	—
<i>B. Isolierpreßstoffe</i>			
13	I. Typ Y, Bleiborat und Glimmer	—	—
14	II. Typ X, Zement oder Wasserglas mit Asbest und anderen anorganischen Füllstoffen	—	—

Chemische Beständigkeit. Die keramischen Stoffe sind beständig gegen

<sup>1</sup> Vgl. Fußnote 1, S. 292.

Die Tabelle 32 befindet sich

Typ Y und X. Thermische Eigenschaften<sup>1</sup>.

Wärme- dehnzahl (20—100°) $\alpha_t \cdot 10^6$	Wärmeleitzahl (20—100°) $\lambda_m$ kcal/h·m·°C	Spezifische Wärme (20—100°) $C_m$ kcal/kg·°C	Feuerfestigkeit (Erweichungs- punkt) °C	Wärmefestig- keit nach MARTENS °C	Glut- festigkeit (0—5)
<i>Isolierstoffe.</i>					
3,5—4,5	1,3—1,4	0,19—0,21	1670	—	—
3,5—4,5	1,3—1,4	0,19—0,21	1670	—	—
4,7	1,4	0,20	—	—	—
6,8	1,6	0,20	—	—	—
7,0—9,0	1,95	0,19—0,22	—	—	—
6,0—8,0	1,9—2,2	0,19—0,22	—	—	—
6,0—8,0	3,0—3,5	0,17—0,19	—	—	—
6,0—8,0	2,5—3,0	0,19—0,21	—	—	—
6,0—10	3,2	0,22	—	—	—
1,1	1,7—2,2	0,20—0,22	—	—	—
1,2—1,7	1,6	0,2	1435	—	—
1,8—4,8	0,7—1,7	0,19—0,20	1350—1770	—	—

*Typ Y und X.*

10	—	—	—	> 400	5
—	—	—	—	> 250	5

alle Säuren außer Flußsäure, bei Raumtemperatur auch gegen alle Alkalien.

aus satztechnischen Gründen auf S. 314!

Tabelle 33. Kunststoffe. Verarbeitungs-

Nr.	Hauptgruppe	Nähere Kennzeichnung des Kunststoffes		Füllstoffe oder Harzträger		
1	Von hochmolekularen Naturstoffen abgewandelte Kunststoffe	Zellulose-Abkömmlinge	Vulkanfaser		—	
2			Äthylzellulose		—	
3			Zellulose-Azetat	Folien		—
4				Formstücke (Typ A)		—
5		Zellulose-Nitrat (Zelluloid)		—		
6		Eiweiß-Abkömmlinge	Kasein-Produkt (Kunstthorn)		—	
7		Kautschuk-Abkömmlinge	Chlorkautschuk		—	
8			Hydrokautschuk		—	
9			Hartgummi		—	
10	—	(Meist Phenol-Formaldehyd-Kondensate)	Kaltpreßmaterial	—	organisch	
11				Typ 2	anorganisch	
12				Typ 3		
13				Typ 4		
14	Aus niedermolekularen Naturstoffen aufgebaute hochmolekulare Kunststoffe <i>I. Poly-Kondensate</i>	Phenol-Formaldehyd-Kondensate	Gußharz		ohne Füllstoff	
15			nicht-geschichtete Preßstoffe	Preßharz		ohne Füllstoff
16				Typ 11		Mineral
17				Typ 12		
18				Typ M		
19				Typ 0		Holzmehl
20				Typ S		
21				Typ Z 1		Papier (Zellulose)
22				Typ Z 2		
23				Typ T 1		Textilien
24		Typ T 2				
25		Schichtstoffe	Typ Z 3		Papier	
26			Hartpapier			
27			Typ T 3		Gewebe	
28			Hartgewebe			
29		—		Asbestgewebe		
30		Anilin-Formaldehyd-Kondensate	Anilinharz		ohne und mit Füllstoff	
31	Phenol-Furfurol-Kondensate	nichtgeschichtete Preßstoffe		Holzmehl		
32				Mineral		
33				Gewebeschnitzel		
34	Harnstoff-Formaldehyd-Kondensate	nichtgeschichtete Preßstoffe	Typ K	Zellulose		
35	<i>II. Polymerisate</i>	Vinyl-Chlorid-Polymerisate	nicht nachchloriert (PCU)		ohne Füllstoff	
36			nachchloriert (PC)			
37			Mischpolymerisat (MP)			
38		Vinyl-Azetat-Polymerisate	—		mit Füllstoff	
39		Methyl-Methakrylat-Polymerisate	(Plexigum)		—	
40		Styrol-Polymerisate	—		—	

<sup>1</sup> Bei dieser Tabelle und den folgenden Tabellen 34 bis 37 ist das deutsche und  
<sup>2</sup> Gütegrade 0 bis 4: 0 überwiegend spangebende Formung, 1 schlecht,

bedingungen und -eigenschaften<sup>1</sup>.

Verformbarkeit <sup>2</sup>	Preßtemperatur °C	Preßdruck kg/cm <sup>2</sup>	Spritztemperatur °C	Spritzdruck kg/cm <sup>2</sup>	Verdichtungsfaktor	Schwindung %
0	—	—	—	—	—	—
4	160—180	105—175	190—220	200—2000	2,2—2,5	0,4—0,7
4	100—160	35—350	—	—	—	—
4	120—175	35—350	130—225	200—2000	2,0—2,8	0,2—0,3
3	85—120	140—350	—	—	—	—
0/1	95—105	140—175	—	—	—	—
2	95—105	140—350	—	—	2—3	—
3	125—150	85—280	—	—	3	0,0
2	140—175	85—125	85—105	140—350	4—6	—
2	~ 20	300—800	—	—	2,5	0,0—2,2
2	~ 20	300—800	—	—	3—4	—
2	~ 20	300—800	—	—	3—4	—
2	~ 20	300—800	—	—	3—4	—
0	—	—	—	—	—	—
2	150—170	150—350	—	—	2,0—2,6	0,9—1,1
4	150—180	150—300	140—180	150—1000	2,0—3,0	0,2—0,6
3	150—180	200—400	140—180	150—1000	2,5—4,0	0,2—0,6
2	150—180	250—600	—	—	4—7	0,2—0,6
4	150—180	150—300	—	—	2,2—3	0,6—1,0
4	150—180	150—300	150—180	150—700	2,2—3	0,6—1,0
3	140—170	200—400	—	—	2,5—5	—
2	140—170	300—500	—	—	4—7	—
3	140—170	200—400	—	—	2,5—6	0,3—0,7
2	140—170	300—600	—	—	4—11	0,3—0,7
1/2	140—170	300—600	—	—	—	—
0	120—185	70—200	—	—	1,5—3,0	—
1	140—170	300—600	—	—	—	—
0	120—185	70—200	—	—	1,5—3,0	—
0/1	120—165	70—200	—	—	—	—
2/4	~ 150	100—200	—	—	—	0,2—0,3
4	165—205	70—200	120—145	20—350	2,5—3,0	0,5—0,9
4	165—180	70—200	120—145	20—350	2,6—6	0,2—0,6
2/3	150—180	70—200	120—145	20—350	4—15	0,25—0,6
4	135—150	100—400	—	—	3	0,6—1,1
3/4	130—170	100—200	150—180	200—2000	2	0,0—0,1
4	—	—	—	—	—	—
3/4	130—160	100—200	150—160	200—2000	2	0,0—0,1
4	120—150	140—180	—	—	1,5—3,5	0,0
4	140—200	100—350	160—240	200—2000	2	0,2—0,3
3	105—150	70—350	150—230	200—2000	2	0,2—0,5

ausländische Schrifttum verwendet worden.

2 mäßig, 3 gut, 4 sehr gut spanlos formbar.

Tabelle 34. Kunststoffe.

Nr.	Hauptgruppe	Nähere Kennzeichnung des Kunststoffes		Füllstoffe oder Harzträger	Spezifischer Widerstand		
					$\Omega \cdot \text{cm}$		
1	Von hochmolekularen Naturstoffen abgewandelte Kunststoffe	Zellulose-Abkömmlinge	Vulkanfaser		—	$5 \cdot 10^5 - 10^6 *$	
2			Äthylzellulose		—	$10^{15}$	
3			Zellulose-Azetat	Folien		—	$5 \cdot 10^{12} - 10^{13}$
4				Formstücke (Typ A)		—	$10^{12} - 10^{13}$
5		Zellulose-Nitrat (Zelluloid)		—	$(2-30) \cdot 10^{10}$		
6		Eiweiß-Abkömmlinge	Kasein-Produkt (Kunsthorn)		—	—	
7		Kautschuk-Abkömmlinge	Chlorkautschuk		—	$2,5 \cdot 10^{13}$	
8			Hydrokautschuk		—	$(5-7) \cdot 10^{16}$	
9			Hartgummi		—	$10^{12} - 10^{18}$	
10	—	(Meist Phenol-Formaldehyd-Kondensate)	Kaltpreßmaterial	—	organisch	$1 \cdot 10^{12}$	
11				Typ 2	—		
12				Typ 3	anorganisch	—	
13				Typ 4	—		
14	Aus niedermolekularen Naturstoffen aufgebaute hochmolekulare Kunststoffe	Phenol-Formaldehyd-Kondensate	Gußharz		ohne Füllstoff	$10^9 - 10^{14}$	
15			nichtgeschichtete Preßstoffe	Preßharz		ohne Füllstoff	$(1-5) \cdot 10^{12}$
16				Typ 11		Mineral	$6 \cdot 10^8 *$ , $10^9 - 10^{11}$
17				Typ 12			
18				Typ M			
19				Typ 0		Holzmehl	$10^{8*}$ , $10^{10} - 10^{12}$
20				Typ S			
21				Typ Z 1			
22				Typ Z 2		Papier (Zellulose)	$10^9 *$
23			Typ T 1				
24			Typ T 2		Textilien	$10^9 *$ , $10^9 - 10^{13}$	
25			Schichtstoffe	Typ Z 3			
26				Hartpapier			
27				Typ T 3			
28				Hartgewebe			
29			—		Asbestgewebe		—
30			Anilin-Formaldehyd-Kondensate	Anilinharz		ohne und mit Füllstoff	$10^{12}$
31			Phenol-Furfurol-Kondensate	nichtgeschichtete Preßstoffe		Holzmehl	$10^{10} - 10^{12}$
32						Mineral	$10^9 - 10^{11}$
33	Gewebeschnitzel	$10^9 - 10^{11}$					
34	Harnstoff-Formaldehyd-Kondensate	nichtgeschichtete Preßstoffe	Typ K	Zellulose	$10^9 *$ , $2 \cdot 10^{13} - 10^{14}$		
35	II. Polymerisate	Vinyl-Chlorid-Polymerisate	nicht nachchloriert (PCU)		ohne Füllstoff	$> 10^{14}$	
36			nachchloriert (PC)				
37			Mischpolymerisat (MP)				
38		Vinyl-Azetat-Polymerisate	—		mit Füllstoff	$10^{11}$	
39		Methyl-Methakrylat-Polymerisate	(Plexigum)		—	$10^{13}$	
40		Styrol-Polymerisate	—		—	$10^{17} - 10^{18}$	

\* Isolationswiderstand zwischen Stöpseln.

## Elektrische Eigenschaften.

Durchschlagsfestigkeit bei 50 Hz  kV/cm	Dielektrizitätskonstante $\epsilon$ bei			Dielektrischer Verlustfaktor $\operatorname{tg} \delta \cdot 10^3$ bei			Oberflächenwiderstand nach VDE-Vorschrift, Vergleichszahl <sup>1</sup>
	50 Hz	800 Hz	10 <sup>6</sup> Hz	50 Hz	800 Hz	10 <sup>6</sup> Hz	
30	—	4	7	—	80	36	> 9
600—1000	—	2,5—3,5	2,0—3,0	—	5—25	7—30	> 12
320—1000	3,5—7,5	3,5—7,0	3,0—5,0	20—70	—	40—90	12
140—360	4,5—6,2	4,5—6,0	4,0—5,0	10—40	20—60	40—60	—
240—480	6,7—7,3	—	6,2	50—150	30	30—100	12
160—280	—	—	6,0—6,8	—	—	52	—
120—270	3	3	—	3—7	7,5	6—13	< 12
—	2,7—3,1	2,68	—	6	—	2	—
100—360	2,8—5	2,8—3,4	3	3,8—50	5—33	3—8	< 12
32	15,0	—	6,0	200	—	70	> 8
40	—	> 10	—	—	—	—	8—11
40	—	> 10	—	—	> 100	—	7—10
90	—	~ 5	—	—	—	—	7—10
120—180	5—10	—	5—7	25—200	5—80	10—45	9—10
160—200	5—6	4—5	4,5—5	50—100	25—60	15—40	> 8
50—160	5—20	4,5—20	4,5—20	100—300	100—500	5—100	8—10
				100—300	100—500	5—100	8—10
				800	600	5—100	7—9
120—200	5—13	4—9	4,5—8	40—300	40—150	35—100	8—11
				40—300	50—300	35—100	8—10
150	—	~ 6	—	—	100	—	8—9
120—200	6,9—14	5,9—9,6	4,5—6	80—400	80—200	30—100	7—9
150—520	—	~ 6	4—6	—	100	20—50	8—9 9
60—360	5—7	—	4,5—7	50—600	100	20—80	8—9 9
35	—	—	—	—	—	—	> 8
100	3—4	—	—	10—20	—	1,5—2	12
160—240	—	4,8	6—7,5	—	40—150	35—100	—
80—200	—	4,5—20	5—18	—	100—150	40—100	8
80—200	—	4,5—6	5—7,5	—	80—200	35—100	—
260—290	6,6	—	6	20—34	20—30	10—30	9—11
260—500	—	3,2	4	8—16	7—23	16—18	12
—	—	4	4	10—30	10—30	20—65	10—12
200—450	3,3—4,5	—	3	10—800	—	20—30	> 12
200—280	2,6	2,6	2,6	< 0,2	< 0,1	< 0,1	> 12

<sup>1</sup> Siehe dazu auch S. 73.

Tabelle 35. Kunststoffe.

Nr.	Hauptgruppe	Nähere Kennzeichnung des Kunststoffes		Füllstoffe oder Harzträger	Bearbeitbarkeit	Raumgewicht		
					(0—4) <sup>1</sup>	g/cm <sup>3</sup>		
1	Von hochmolekularen Naturstoffen abgewandelte Kunststoffe	Zellulose-Abkömmlinge	Vulkanfaser		—	2	1,10—1,45	
2			Äthylzellulose		—	3	1,14	
3			Zellulose-Azetat	Folien	—	3	1,27—1,40	
4		Formstücke (Typ A)		—	3	1,27—1,40		
5		Eiweiß-Abkömmlinge	Zellulose-Nitrat (Zelluloid)		—	3	1,35—1,60	
6			Kasein-Produkt (Kunsthorn)		—	3	1,3—1,4	
7			Chlorkautschuk		—	—	1,64	
8			Hydrokautschuk		—	3	1,06	
9			Hartgummi		—	2	1,12—1,80	
10	—	(Meist Phenol-Formaldehyd-Kondensate)	Kaltpreßmaterial	—	organisch	1	1,8 —2,0	
11				Typ 2	—	1	1,8 —2,2	
12			Typ 3	anorganisch	1	1,8 —2,2		
13			Typ 4	—	1	1,8 —2,2		
14	Aus niedrigmolekularen Naturstoffen aufgebaute hochmolekulare Kunststoffe	Phenol-Formaldehyd-Kondensate	Gußharz		ohne Füllstoff	4	1,27—1,35	
15			nichtgeschichtete Preßstoffe	Preßharz		ohne Füllstoff	2	1,28—1,35
16				Typ 11	Mineral	1	1,7 —2,1	
17				Typ 12		2	1,7 —2,1	
18				Typ M		2	1,7 —2,1	
19				Typ O		Holzmehl	2	1,3 —1,4
20				Typ S	2		1,36—1,40	
21				Typ Z 1	Papier (Zellulose)	2	1,4	
22				Typ Z 2		2	1,4	
23				Typ T 1		Textilien	2	1,36—1,40
24				Typ T 2			2	1,36—1,40
25			Typ Z 3	Papier	2—4	1,34—1,40		
26		Schichtstoffe	Hartpapier		2—4	1,37—1,55		
27			Typ T 3		2—4	1,34—1,40		
28			Hartgewebe		2—4	1,37—1,55		
29		—	—	Asbestgewebe	2—4	1,6 —1,65		
30		Anilin-Formaldehyd-Kondensate	Anilinharz		ohne und mit Füllstoff	2—3	1,20—1,25	
31		Phenol-Furfurol-Kondensate	nichtgeschichtete Preßstoffe		Holzmehl	2—3	1,3 —1,4	
32					Mineral	2—3	1,6 —2,0	
33		Harnstoff-Formaldehyd-Kondensate	nichtgeschichtete Preßstoffe		Gewebeschnitzel	2—3	1,3 —1,4	
34	Typ K				Zellulose	2	1,45—1,50	
35	II. Polymerisate	Vinyl-Chlorid-Polymerisate	nicht nachchloriert (PCU)		ohne Füllstoff	3	1,34—1,32	
36			nachchloriert (PC)			3	1,34—1,36	
37			Mischpolymerisat (MP)			3	1,34—1,36	
38		Vinyl-Azetat-Polymerisate	—		mit Füllstoff	3	1,35—2,5	
39		Methyl-Methakrylat-Polymerisate	(Plexigum)		—	4	1,18	
40		Styrol-Polymerisate	—		—	1—3	1,05—1,07	

<sup>1</sup> 0 = sehr schlecht, 4 = sehr gut.



## Mechanische Eigenschaften.

Spezifisches Volumen cm <sup>3</sup> /g	Zugversuch		Elastizitätsmodul kg/cm <sup>2</sup> · 10 <sup>3</sup>	Druckfestigkeit kg/cm <sup>2</sup>	Kugeldruckhärte (nach VDE; 60 s) kg/cm <sup>2</sup>	Biegefestigkeit kg/cm <sup>2</sup>	Schlagfestigkeit	
	Zugfestigkeit kg/cm <sup>2</sup>	Dehnung %					ohne Kerb (Schlagbiegefestigkeit) cmkg/cm <sup>2</sup>	mit Kerb (Kerbzähigkeit) cmkg/cm <sup>2</sup>
0,69—0,91	500—1200	—	50	3000	800—1400	800—1300	120—190	17
0,88	490—630	10—40	14—28	700—840	—	630—700	—	—
0,72—0,80	420—770	20—55	7—21	280—1120	500	550	100—200	—
0,72—0,80	245—700	8—30	14—28	500—1120	600	> 300	> 15,0	15
0,62—0,74	350—700	10—40	14—28	600	600	600	100—200	12
0,72—0,77	530	—	36—40	700—1200	1300	1000—1800	20—40	—
0,61	190—350	0,5—2,2	—	—	—	—	—	—
0,94	300	—	33	600—770	—	490—630	—	—
0,56—0,89	280—700	8—15	37	560—840	—	560—1050	—	—
0,50—0,56	—	—	—	420—1050	—	370—525	—	—
0,45—0,56	—	—	—	~ 1100	—	> 350	> 2,0	—
0,45—0,56	—	—	—	~ 1100	—	> 200	> 1,7	—
0,45—0,56	—	—	—	~ 1100	—	> 150	> 1,2	—
0,74—0,80	350—840	—	35—105	1050—2100	1300	1200	25—30	1,5
0,74—0,78	420—630	—	50—70	—	—	840—1200	5—25	0,8—1,6
0,48—0,59	> 250	—	90—150	> 1200	> 1800	> 500	> 3,5	> 1,0
0,48—0,59	> 250	—	90—150	> 1200	> 1500	> 500	> 3,5	> 2,0
0,48—0,59	> 250	—	90—150	> 1200	> 1500	> 700	> 15,0	> 15,0
0,72—0,77	> 250	—	55—80	> 2000	> 1300	> 600	> 5,0	> 1,5
0,72—0,74	> 250	—	55—80	> 2000	> 1300	> 700	> 6,0	> 1,5
0,72	> 250	—	40—80	> 1400	> 1300	> 600	> 5,0	> 3,5
0,72	> 250	—	60—100	> 1000	> 1300	> 800	> 8,0	> 5,5
0,72—0,74	> 250	—	50—90	> 1400	> 1300	> 600	> 6,0	> 6,0
0,72—0,74	> 250	—	70—100	> 1400	> 1300	> 600	> 12,0	> 12,0
0,72—0,75	> 800	—	80—130	> 1600	> 1300	> 1200	> 15,0	> 10,0
0,65—0,73	> 1200	—	80—110	> 1500	> 1300	> 1300	> 25,0	—
0,72—0,75	> 500	—	40—50	> 1200	> 1300	> 800	> 25,0	—
0,65—0,73	500—800	—	60—90	> 2000	> 1300	> 1000	> 25,0	—
0,61—0,63	630	—	—	1260—2800	—	900—1400	—	—
0,80—0,83	700	—	20—30	—	—	650—1200	10—25	1,5—2,5
0,72—0,77	420—770	—	70—170	1960—2520	—	560—1050	—	—
0,50—0,63	350—700	—	70—315 (?)	1680—2520	—	560—1400	—	—
0,72—0,77	455—560	—	50—85	1820—2100	—	700—910	—	—
0,67—0,69	> 250	—	50—100	> 1800	> 1500	> 600	> 5,0	> 1,2
0,73—0,75	580	—	34	200	1000	950—1150	50—240	5
0,73—0,75	—	—	—	—	—	—	—	—
0,73—0,75	560—700	—	32	—	1000	1000	100—400	1,5—3
0,40—0,74	420—840	—	24—60	—	—	525—840	—	—
0,85	500—800	1—4	28—42	560	1650—1850	1000—1400	20	—
0,94—0,95	385—600	1,0	30—36	910—950	1100	500—1100	20	5

Tabelle 36. Kunststoffe.

Nr.	Hauptgruppe	Nähere Kennzeichnung des Kunststoffes		Füllstoffe oder Harzträger	Wärme- dehnzahl <sup>1</sup>		
					$\alpha_t \cdot 10^6$		
					(0°—50°)		
1	Von hochmolekularen Naturstoffen abgewandelte Kunststoffe	Zellulose-Abkömmlinge	Vulkanfiber		—		
2			Äthylzellulose		—		
3			Zellulose-Azetat	Folien		100—140	
4				Formstücke (Typ A)		110—160	
5		Zellulose-Nitrat (Zelluloid)		—	100—160		
6		Eiweiß-Abkömmlinge	Kasein-Produkt (Kunsthorn)		—	80	
7		Kautschuk-Abkömmlinge	Chlorkautschuk		—	120—130	
8			Hydrokautschuk		—	70—80	
9			Hartgummi		—	80	
10	—	(Meist Phenol-Formaldehyd-Kondensate)	Kaltpreßmaterial	—	organisch	—	
11				Typ 2	—		
12			Typ 3	anorganisch	—		
13			Typ 4	—			
14	Aus niedrigmolekularen Naturstoffen aufgebaute hochmolekulare Kunststoffe <i>I. Poly-Kondensate</i>	Phenol-Formaldehyd-Kondensate	Gußharz		ohne Füllstoff	28—96	
15			nichtgeschichtete Preßstoffe	Preßharz		ohne Füllstoff	—
16				Typ 11		—	15—30
17				Typ 12		Mineral	15—30
18				Typ M		—	15—30
19				Typ 0		—	30—60
20				Typ S		Holzmehl	30—50
21				Typ Z 1		—	15—30
22				Typ Z 2		Papier (Zellulose)	10—30
23			Typ T 1		—	15—30	
24			Typ T 2		Textilien	15—30	
25			Typ Z 3		—	10—30	
26			Hartpapier		Papier	10—25	
27		Typ T 3		—	15—30		
28		Hartgewebe		Gewebe	10—25		
29		—		—	Asbestgewebe	20	
30		Anilin-Formaldehyd-Kondensate	Anilinharz		ohne und mit Füllstoff	45	
31		Phenol-Furfurol-Kondensate	nichtgeschichtete Preßstoffe		Holzmehl	30	
32					Mineral	20	
33	Gewebeschnitzel				45		
34	Harnstoff-Formaldehyd-Kondensate	nichtgeschichtete Preßstoffe	Typ K	Zellulose	15—50		
35	<i>II. Poly-merisate</i>	Vinyl-Chlorid-Polymerisate	nicht nachchloriert (PCU)		—	69	
36			nachchloriert (PC)		ohne Füllstoff	—	
37			Mischpolymerisat (MP)		—	78	
38		Vinyl-Azetat-Polymerisate	—		mit Füllstoff	—	
39		Methyl-Methakrylat-Polymerisate	(Plexigum)		—	82—130	
40		Styrol-Polymerisate	—		—	70—102	

<sup>1</sup> Bei härtbaren Stoffen stark abhängig vom Härtegrad. <sup>2</sup> Eingeklammerte Werte

## Thermische Eigenschaften.

Physikalische Konstanten			Technologische Eigenschaften					
Wärmeleitfähigkeit		Spezifische Wärme cal · 10 <sup>3</sup> g	Wärme- festigkeit nach MARTENS <sup>2</sup> °C	Zulässige Höchsttemperatur			Glut- festig- keit <sup>3</sup> (0—5)	
cal cm · s · °C · 10 <sup>3</sup> (CGS- System)	kcal m · h · °C · 10 <sup>3</sup> (Techn. Maßsyst.)			bei dauernder Wärme- beanspru- chung °C	bei kurzzeitiger Wärmebeanspru- chung und Berücksichtigung der	Biegef. (-10%) °C		Schlagbf. (-10%) °C
50—80	18—29	—	70—90	—	—	—	—	—
56	20	25—40	55—65	—	—	—	—	1
50—87	18—32	30—40	35—50	—	—	—	—	1
50—87	18—32	30—45	> 40	—	—	—	—	1
31—51	11—19	34—38	40	—	—	—	—	0
~ 40	~ 14	—	50—60	—	—	—	—	(2—3)
30	11	37	(60)	—	—	—	—	(4)
26—29	9—11	—	(75—105)	—	—	—	—	(1—2)
32	12	33	—	—	—	—	—	(1)
—	—	—	—	—	—	—	—	(3)
—	—	—	> 150	150	—	—	—	4
—	—	—	> 150	150	—	—	—	4
—	—	—	> 150	150	—	—	—	4
30—65	11—24	30—40	55	—	—	—	—	3
—	—	—	—	—	—	—	—	(3)
75	27	25—35	> 150	150	215	215	200	4
75	27	25—35	> 150	150	215	215	200	4
75	27	25—35	> 150	150	215	215	200	4
75	27	35—36	> 100	100	—	—	—	2
75	27	35—36	> 125	100	135	130	130	3
~ 75	~ 27	30—40	> 125	100	100	125	165	3
~ 75	~ 27	30—40	> 125	100	100	125	165	3
90	32	30—35	> 125	100	135	115	130	2
90	32	30—35	> 125	100	135	115	130	2
* ~ 70	~ 25	30—40	> 125	100	100	125	165	3
~ 70	~ 25	30—40	—	100	—	—	—	2—3
80	29	30—40	> 125	100	135	115	130	2
82	30	30—40	—	100	—	—	—	2
—	—	—	—	150	—	—	—	(4)
—	—	—	110	—	—	—	—	1
35—50	13—18	30—40	(130—140)	—	—	—	—	(3)
100—200	36—73	30—40	(135—145)	—	—	—	—	(4)
50—80	18—29	30—40	—	—	—	—	—	(3)
71—85	26—31	—	> 100	65	90	90	80	3
40	14	24	(60—70)	—	—	—	—	—
—	—	—	—	—	—	—	—	—
~ 50	~ 18	—	58	—	—	—	—	2
—	—	—	(60—70)	—	—	—	—	—
43—68	16—25	45	62—80	—	—	—	—	1
19—38	7—14	32	60—70	—	—	—	—	1

sind nach amerikanischen Verfahren ermittelt. <sup>3</sup> 0 = stark brennbar, 5 = unbrennbar.

Tabelle 37. Kunststoffe. Physikalisch-

Nr.	Hauptgruppe	Nähere Kennzeichnung des Kunststoffes	Füllstoffe oder Harzträger	Wasser-aufnahme in 7 Tagen mg/dm <sup>2</sup>		
1	Von hochmolekularen Naturstoffen abgewandelte Kunststoffe	Zellulose-Abkömmlinge	Vulkanfiber	—	sehr groß	
2			Äthylzellulose	—	ziemlich groß	
3			Zellulose-Azetat	Folien	—	1000
4		Formstücke (Typ A)		—	1000	
5			Zellulose-Nitrat (Zelluloid)	—	200	
6		Eiweiß-Abkömmlinge	Kasein-Produkt(Kunsthorn)	—	sehr groß	
7		Kautschuk-Abkömmlinge	Chlorkautschuk	—	gering	
8			Hydrokautschuk	—	sehr gering	
9			Hartgummi	—	sehr gering	
10	—	(Meist Phenol-Formaldehyd-Kondensate)	Kaltpreßmaterial	organisch	gering	
11				Typ 2	sehr gering	
12			Typ 3	anorganisch	sehr gering	
13			Typ 4	sehr gering		
14	Aus niedrigmolekularen Naturstoffen aufgebaute hochmolekulare Kunststoffe <i>I. Poly-Kondensate</i>	Phenol-Formaldehyd-Kondensate	Gußharz	ohne Füllstoff	135	
15			nicht-geschichtete Preßstoffe	Preßharz	ohne Füllstoff	sehr gering
16				Typ 11	Mineral	50
17				Typ 12		50
18				Typ M	Holzmehl	60
19				Typ O		200
20				Typ S	200	
21				Typ Z 1	Papier (Zellulose)	600
22				Typ Z 2		600 *
23				Typ T 1	Textilien	500
24				Typ T 2		500
25			Schichtstoffe	Typ Z 3	Papier	600
26				Hartpapier		300—1500 <sup>1</sup>
27		Typ T 3		Gewebe	500	
28		Hartgewebe	—			
29		—	Asbestgewebe	gering		
30		Anilin-Formaldehyd-Kondensate	Anilinharz	ohne und mit Füllstoff	17—24	
31		Phenol-Furfurol-Kondensate	nichtgeschichtete Preßstoffe	Holzmehl	gering	
32				Mineral	sehr gering	
33	Gewebeschnitzel	gering				
34	Harnstoff-Formaldehyd-Kondensate	nichtgeschichtete Preßstoffe	Typ K	Zellulose	140	
35	<i>II. Polymerisate</i>	Vinyl-Chlorid-Polymerisate	nicht nachchloriert (PCU)	ohne Füllstoff	—	
36			nachchloriert (PC)		—	
37			Mischpolymerisat (MP)		30	
38		Vinyl-Azetat-Polymerisate	—	mit Füllstoff	—	
39		Methyl-Methakrylat-Polymerisate	(Plexigum)	—	125—140	
40		Styrol-Polymerisate	—	—	0	

<sup>1</sup> Bei 3 mm Dicke.

chemische und chemische Eigenschaften.

Einfluß von				organischen Lösungsmitteln	Einfluß auf eingepreßte Metalle	Einfluß von	
schwachen	starken	schwachen	starken			Sonnenlicht	Alterung
Säuren		Alkalien					
—	—	—	—	—	—	—	—
gering	Zersetzung	kein	kein	meist lösend	kein	gering	gering
gering	Zersetzung	gering	Zersetzung	Ketone und Ester lösen; Alkohole erweichen; aromatische Kohlenwasserstoffe geringe Wirkung	kein	gering	gering
gering	Zersetzung	gering	Zersetzung		kein	gering	gering
gering	Zersetzung	gering	Zersetzung		kein	verfärbt, versprödet	versprödet langsam
kaum	Zersetzung	Erweichung	Zersetzung	kein	—	Verfärbung möglich	Härtezunahme
kein	kein	kein	kein	aromatische Kohlenwasserstoffe lösen	—	dunkelt	versprödet etwas
kein	kein	kein	kein	einige greifen an	kein	geringer Oberflächenangriff	kein
kein	oxydier. Säuren: Zersetzung	kein	kein	einige greifen an	—	verfärbt; Oberflächenangriff	kein
gering	Zersetzung	Zersetzung	Zersetzung	einige greifen an	kein	—	—
Angriff	Zersetzung	kein	kein	kein	kein	—	—
Angriff	Zersetzung	kein	kein	kein	kein	—	—
Angriff	Zersetzung	kein	kein	kein	kein	—	—
Kein bis geringer Angriff je nach Säure	Zersetzung durch oxydierende Säuren; reduzier. und organische Säuren meist nur geringe oder keine Wirkung	geringer bis mäßig starker Angriff je nach Alkalität	Zersetzung	kein	kein	meist Verfärbung	Je nach Aushärtungsgrad kein Einfluß oder Zunahme der elektrischen und mechanischen Eigenschaftswerte
				kein	kein	Oberfläche dunkelt	
				überwiegend kein Einfluß	kein	Nachdunkeln	
					kein	Nachdunkeln	
					kein	Nachdunkeln	
					kein	Nachdunkeln	
					kein	Nachdunkeln	
					kein	Nachdunkeln	
					kein	Nachdunkeln	
					kein	Nachdunkeln	
					kein	Nachdunkeln	
					kein	Nachdunkeln	
					kein	Nachdunkeln	
					kein	Nachdunkeln	
					kein	Nachdunkeln	
kein	Nachdunkeln						
kein	Oberflächenfestigkeit leidet	geringes Nachdunkeln					
kein	—						
kein	kein	kein	Härtezunahme				
kein	kein	kein	Härtezunahme				
kein	kein	kein	Härtezunahme				
kein	kein	kein	Härtezunahme				
kein	kein	kein	Härtezunahme				
kein	kein	kein	Härtezunahme				
kein	kein	kein	Härtezunahme				
kein	kein	kein	Härtezunahme				
kein	kein	kein	Härtezunahme				
kein	kein	kein	Härtezunahme				
kein	kein	kein	Härtezunahme				
Einflußgrad vom Füllstoff abhängig				Ester lösen; aromatische Kohlenwasserstoffe quellen	kein	dunkelt nach	Festigkeit unbeeinflußt
kein	gering	kein	gering		kein	—	—
kein	gering	kein	gering		kein	—	—
kein	gering	kein	gering	Ketone, Ester, aromatische Kohlenwasserstoffe lösen	—	sehr gering	sehr gering
kein	kein	kein	kein	aromatische und chlorhaltige Kohlenwasserstoffe lösen	kein	leichtes Vergilben	sehr gering

## D. Umrechnungstabellen für physikalische

Tabelle 38. Umrechnungstafel für physikalische  
Dimension

	mkg	PSs	PSH	erg	Joule int. = W <sub>s</sub>	kWh
mkg . . . . .	1	$1,333 \cdot 10^{-2}$	$0,370 \cdot 10^{-5}$	$9,80665 \cdot 10^7$	9,80665	$2,725 \cdot 10^{-6}$
PSs . . . . .	75	1	$2,78 \cdot 10^{-4}$	$7,36 \cdot 10^9$	736	$2,05 \cdot 10^{-4}$
PSH . . . . .	$2,703 \cdot 10^5$	$3,6 \cdot 10^3$	1	$2,6478 \cdot 10^{13}$	$2,6478 \cdot 10^6$	0,735
erg . . . . .	$1,02 \cdot 10^{-8}$	$1,36 \cdot 10^{-10}$	$0,3775 \cdot 10^{-13}$	1	$10^{-7}$	$0,278 \cdot 10^{-13}$
Joule int. = W <sub>s</sub> . . . . .	0,102	$1,36 \cdot 10^{-3}$	$0,3777 \cdot 10^{-6}$	$10^7$	1	$0,278 \cdot 10^{-6}$
kWh . . . . .	$3,67 \cdot 10^5$	$4,878 \cdot 10^3$	1,361	$3,6 \cdot 10^{13}$	$3,6 \cdot 10^6$	1
Lt. Atm. . . . .	$1,0338 \cdot 10^1$	$1,3774 \cdot 10^{-1}$	$3,8314 \cdot 10^{-5}$	$1,0142 \cdot 10^9$	101,42	$2,817 \cdot 10^{-5}$
gcal (mittlere)	$4,27168 \cdot 10^{-1}$	$5,6818 \cdot 10^{-3}$	$1,5822 \cdot 10^{-6}$	$4,186 \cdot 10^7$	4,186	$1,163 \cdot 10^{-6}$
kcal „	427,168	5,6818	$1,5822 \cdot 10^{-3}$	$4,186 \cdot 10^{10}$	4186	$1,163 \cdot 10^{-3}$
ft lb . . . . .	0,13826	$1,8397 \cdot 10^{-3}$	$5,1232 \cdot 10^{-7}$	$1,35582 \cdot 10^7$	1,35582	$3,7662 \cdot 10^{-1}$
B.T.U. (mean)	$1,0763 \cdot 10^2$	1,434	$3,9857 \cdot 10^{-4}$	$1,0556 \cdot 10^{10}$	$1,0556 \cdot 10^3$	$0,2932 \cdot 10^{-3}$
H.P.St. . . . .	328,4	$0,3642 \cdot 10^4$	1,0149	$2,6845 \cdot 10^{13}$	$2,6845 \cdot 10^6$	0,7459

Tabelle 39. Umrechnungstafel für physikalische  
Dimension

	mkg/s	PS	HP	erg/s
mkg/s . . . . .	1	0,0133	0,01315	$9,80665 \cdot 10^7$
PS . . . . .	75	1	0,986337	$735,499 \cdot 10^7$
HP . . . . .	76,046	1,01385	1	$745,7 \cdot 10^7$
erg/s . . . . .	$1,02 \cdot 10^{-8}$	$1,360 \cdot 10^{-10}$	$1,341 \cdot 10^{-10}$	1
Joule/s = Watt	0,102	$1,360 \cdot 10^{-3}$	$1,341 \cdot 10^{-3}$	$1,0000 \cdot 10^7$
kW . . . . .	102,0	1,360	1,341	$10^{10}$
gcal/s . . . . .	0,42662	$5,69 \cdot 10^{-3}$	$5,5835 \cdot 10^{-3}$	$4,186 \cdot 10^{-7}$
kcal/h . . . . .	0,1191	$1,5805 \cdot 10^{-3}$	$1,5505 \cdot 10^{-3}$	$1,1628 \cdot 10^7$
ft pound/s . . . . .	0,13829	1,8439	$1,8181 \cdot 10^{-3}$	$1,35582 \cdot 10^7$

## und technische Einheiten.

und technische Arbeitseinheiten.

 $l^2 \cdot m \cdot t^{-2}$ .

Lt. Atm.	gcal	kcal	ft lb	B.T.U. (mean)	H.P. St.
$9,6734 \cdot 10^{-2}$	2,3410	$2,3410 \cdot 10^{-3}$	7,2330	$9,290 \cdot 10^{-3}$	$3653 \cdot 10^{-6}$
7,26	$1,76 \cdot 10^2$	$1,76 \cdot 10^{-1}$	543,58	0,6975	$2,746 \cdot 10^{-4}$
$2,61 \cdot 10^4$	$6,320 \cdot 10^5$	$6,32 \cdot 10^2$	$1,9519 \cdot 10^6$	$2,509 \cdot 10^3$	0,9862
$9,86 \cdot 10^{-10}$	$0,239 \cdot 10^{-7}$	$0,239 \cdot 10^{-10}$	$0,73756 \cdot 10^{-7}$	$0,9473 \cdot 10^{-10}$	$0,3725 \cdot 10^{-13}$
$9,86 \cdot 10^{-3}$	0,23872	$0,23872 \cdot 10^{-3}$	0,73756	$0,9473 \cdot 10^{-3}$	$0,3725 \cdot 10^{-6}$
$3,55 \cdot 10^4$	$8,60 \cdot 10^5$	$8,60 \cdot 10^2$	$2,6552 \cdot 10^6$	$3,4103 \cdot 10^3$	1,3419
1	$2,4188 \cdot 10^1$	$2,4188 \cdot 10^{-2}$	74,735	$9,599 \cdot 10^{-2}$	$37,74 \cdot 10^{-6}$
$4,1342 \cdot 10^{-2}$	1	$10^{-3}$	3,0885	$3,9683 \cdot 10^{-3}$	$1,5604 \cdot 10^{-6}$
$4,1342 \cdot 10^1$	1000	1	3088,5	3,9683	$1,5604 \cdot 10^{-3}$
$1,3381 \cdot 10^{-2}$	0,32378	$0,32378 \cdot 10^{-3}$	1	$1,2844 \cdot 10^{-3}$	$5,0505 \cdot 10^{-7}$
10,418	$2,5199 \cdot 10^3$	0,25199	778,57	1	$3,9322 \cdot 10^{-4}$
$0,0265 \cdot 10^6$	$6,409 \cdot 10^5$	$0,6409 \cdot 10^3$	$1,98 \cdot 10^6$	$2,5431 \cdot 10^3$	1

und technische Leistungseinheiten.

 $l^2 \cdot m \cdot t^{-3}$ .

Joule/s = W	kW	gcal/s	kcal/h	ft pound/s
9,80665	$9,80665 \cdot 10^{-3}$	2,344	8,398	7,2312
735,499	0,735499	175,8	632,7	0,54233
745,7	0,7457	179,1	644,95	$0,55003 \cdot 10^3$
$10^{-7}$	$10^{-10}$	$0,2389 \cdot 10^{-7}$	$0,860 \cdot 10^{-7}$	$0,73756 \cdot 10^{-7}$
1	$10^{-3}$	0,2389	0,860	0,73756
$10^3$	1	238,9	860	$0,73756 \cdot 10^3$
4,186	$4,186 \cdot 10^{-3}$	1	3,6	$3,0873 \cdot 10^{-3}$
1,1628	$1,1628 \cdot 10^{-3}$	0,27778	1	$8,5763 \cdot 10^{-4}$
1,35582	$1,35582 \cdot 10^{-3}$	323,91	1166,0	1

Tabelle 29. Keramische Isolierstoffe. Spezifische Widerstände<sup>1</sup> bei 100 V Wechselspannung und 50 Hz [ $\Omega$  cm].

Werkstoff	200°	300°	400°	500°	600°
Hartporzellan					
Hersteller A . . .	$7,2 \cdot 10^8$	$2,0 \cdot 10^7$	$1,6 \cdot 10^6$	$2,4 \cdot 10^5$	$5,6 \cdot 10^4$
Hartporzellan					
Hersteller B . . .	$5,7 \cdot 10^8$	$1,5 \cdot 10^7$	$1,1 \cdot 10^6$	$1,8 \cdot 10^5$	$4,2 \cdot 10^4$
Steatit . . . . .	$3,0 \cdot 10^{11}$	$2,0 \cdot 10^{10}$	$7,6 \cdot 10^9$	$1,9 \cdot 10^9$	$2,8 \cdot 10^8$
Calit . . . . .	$1,0 \cdot 10^{12}$	$5,8 \cdot 10^{10}$	$6,3 \cdot 10^9$	$9,4 \cdot 10^8$	$1,1 \cdot 10^8$
Condensa F . . . .	$1,7 \cdot 10^9$	$2,5 \cdot 10^8$	$2,5 \cdot 10^7$	$2,5 \cdot 10^6$	$3,1 \cdot 10^5$
Condensa N . . . .	$9,0 \cdot 10^8$	$6,7 \cdot 10^7$	$7,3 \cdot 10^6$	$1,2 \cdot 10^6$	$2,5 \cdot 10^5$
Condensa C . . . .	$7,1 \cdot 10^8$	$1,9 \cdot 10^8$	$1,1 \cdot 10^7$	$1,1 \cdot 10^6$	$1,9 \cdot 10^5$
Tempa S . . . . .	$2,0 \cdot 10^{10}$	$2,8 \cdot 10^{10}$	$4,8 \cdot 10^9$	$3,8 \cdot 10^8$	$2,1 \cdot 10^7$
Ardostan . . . . .	$6,9 \cdot 10^8$	$2,5 \cdot 10^7$	$2,3 \cdot 10^6$	$4,0 \cdot 10^5$	$1,0 \cdot 10^5$

<sup>1</sup> Nach Messungen der PTR (E. F. RICHTER, Berlin). Die Werte bei 200° C sind im allgemeinen unter Zugrundelegung des Ersatzschaltbildes, verlustfreier Kondensator mit parallelgeschaltetem Widerstand, aus Kapazitäts- und Verlustfaktormessungen

nach der Formel  $\rho = \frac{1 \cdot 8}{f \cdot \varepsilon \cdot \operatorname{tg} \delta}$  ( $f$  = Frequenz) errechnet. Bei höheren Temperaturen ist der Wechselstromwiderstand praktisch gleich dem Scheinwiderstand und ist aus Strom- und Spannungsmessung zu ermitteln, vgl. dazu auch S. 95.

Tabelle 40. Umrechnungstafel für Druckeinheiten.

	dyn/cm <sup>2</sup>	Bar	kg/m <sup>2</sup>	Torr	760 Torr (Atm.)	kg/cm <sup>2</sup> (at)
1 Bar . . . . .	$10^6$	1	$1,01972 \cdot 10^4$	750,06	0,98692	1,01972
1 Millibar . . . . .	$10^5$	$10^{-3}$	10,1972	0,75006	$0,98692 \cdot 10^{-3}$	$1,01972 \cdot 10^{-3}$
1 $\mu$ bar . . . . .	1	$10^{-6}$	$1,01972 \cdot 10^{-2}$	$0,75006 \cdot 10^{-3}$	$0,98692 \cdot 10^{-6}$	$1,01972 \cdot 10^{-6}$
1 kg/m <sup>2</sup> = 1 mm Wassersäule	98,0620	$0,980665 \cdot 10^{-4}$	1	$0,73556 \cdot 10^{-1}$	$0,96784 \cdot 10^{-4}$	$10^{-4}$
1 Torr = 1 mm Hg-Säule . . . .	1332,76	$1,33322 \cdot 10^{-3}$	13,5951	1	$1,31579 \cdot 10^{-3}$	$1,35951 \cdot 10^{-3}$
760 Torr = 1 Atm. . . . .	$101,321 \cdot 10^4$	1,01325	$1,03323 \cdot 10^4$	760	1	1,03323
1 kg/cm <sup>2</sup> = 1 at . . . . .	980620	0,980665	$10^4$	735,56	0,96784	1

Tabelle 41. Längenmaße.

1 mm	= 39,370 mils	1 mil	= 0,025400 mm
1 mm	= 0,039370 inch	1 inch	= 25,400 mm
1 m	= 3,2808 feet	1 foot	= 0,30480 m
1 m	= 1,09361 yard	1 yard	= 0,91440 m
1 km	= 0,62137 mile	1 mile	= 1,60934 km
1 km	= 0,5396 nautical mile	1 nautical mile	= 1,8532 km

Tabelle 42. Flächenmaße.

1 qcm	= 0,1550 squ. in.	1 squ. in.	= 6,45159 qcm
1 qcm	= 0,1973 circ. in.	1 circ. in.	= 5,0671 qcm
1 qm	= 10,7639 squ. feet	1 squ. foot	= 0,09290 qm
1 qm	= 1,1960 squ. yards	1 squ. yard	= 0,83613 qm
1 qkm	= 0,38610 squ. mile	1 squ. mile	= 2,5900 qkm
1 ha	= 2,4711 acres	1 acre	= 0,4047 ha



Tabelle 43. Hohlmaße.

1 ccm	= 0,061024 cubic in.	1 cubic inch	= 16,3870 ccm
1 cbm	= 35,31476 cubic feet	1 cubic foot	= 0,02832 cbm
1 cbm	= 1,30795 cubic yard	1 cubic yard	= 0,76455 cbm
1 l	= 0,21998 gallon	1 gallon	= 4,5460 l
1 hl	= 2,74969 bushels	1 bushel	= 0,36338 hl
1 l	= 0,26417 U. S. gallon	1 U. S. gallon	= 3,78540 l
1 hl	= 2,83774 U. S. bushels	1 U. S. bushel	= 0,35239 hl

Tabelle 44. Gewichte.

1 g	= 5 karat	1 karat	= 0,2 g
1 g	= 15,432 grains	1 grain	= 0,06480 g
1 g	= 0,0353 ounces (avoir)	1 ounce (avoir)	= 28,350 g
1 kg	= 2,20462 pounds	1 pound (avoir)	= 0,45359 kg
1 kg	= 0,0196841 hundred weights	1 hundred weight (ct)	= 50,8023 kg
1 Tonne = 1000 kg	= 0,9842 tons	1 ton	= 1,01604 Tonner
1 Tonne	= 1,1023 short tons	1 short ton = 2000 lbs.	= 0,9072 Tonnen

Tabelle 45. Abgeleitete Größen (Druck siehe dazu auch Tabelle 40).

1 g/m	= 0,032253 ounces/yard	1 ounce (avoir)/yard	= 31,003 g/m
1 kg/m	= 0,671970 pounds/foot	1 pound/foot	= 1,48816 kg/m
1 kg/m	= 2,0159 pounds/yard	1 pound/yard	= 0,49606 kg/m
1 mkg/cm <sup>2</sup>	= 46,5 ft lbs/in <sup>2</sup>	1 ft lbs/in <sup>2</sup>	= 0,0215 mkg/cm
1 cmkg/cm <sup>2</sup>	= 0,465 ft lbs/in <sup>2</sup>	1 ft lbs/in <sup>2</sup>	= 2,15 cmkg/cm <sup>2</sup>
1 g/m <sup>2</sup>	= 0,029494 ounces (avoir)/squ. yard	1 ounce (avoir)/squ. yard	= 33,906 g/m <sup>2</sup>
1 kg/cm <sup>2</sup>	= 14,2233 pounds/squ. in.	1 pound/squ. in.	= 0,070307 kg/cm
1 kg/qm	= 0,20482 pounds/squ.foot	1 pound/squ. foot	= 4,8824 kg/m <sup>2</sup>
1 Atm.	= 14,706 pounds/squ. in.	1 pound/squ. in.	= 0,0680 Atm.
1 kg/mm <sup>2</sup>	= 0,6349 tons/squ. in.	1 ton/squ. in.	= 1,575 kg/mm <sup>2</sup>
1 g/ccm	= 0,0362 lbs/in <sup>3</sup>	1 lbs/in <sup>3</sup>	= 27,62 g/cm <sup>3</sup>

Tabelle 46. Temperatur.

1° F	= 0,5556° C	1° C	= 1,8° F
° C	= $\frac{5(^{\circ}\text{F}-32)}{9}$	° F	= $\frac{9}{5}^{\circ}\text{C} + 32$

Tabelle 47. Geschwindigkeit.

1 km/h	= 0,91134 feet/s	1 foot/s	= 1,09728 km/h
1 m/s	= 2,23694 mile/h	1 mile/h	= 0,44704 m/s
1 km/h	= 0,62137 mile/h	1 mile/h	= 1,60934 km/h

Tabelle 48. Elektrische Feldstärke und Isolationswiderstand.

1 V/cm = 10 <sup>-1</sup> kV/mm	= 25,4 · 10 <sup>-1</sup> V/mil	1 V/mil	= 39,37 V/mm
			= 393,7 V/cm
1 MΩ km	= 0,6214 MΩ mile	1 MΩ mile	= 1,609 MΩ km

Tabelle 32. Naturstoffe. Elektrische Eigenschaften.

	Spezifischer Widerstand $\Omega \cdot \text{cm}$	Durchschlagsfestigkeit kV/cm	Dielektrizitätskonstante $\epsilon$ bei			Dielektrischer Verlustfaktor $\text{tg } \delta \cdot 10^4$ bei			Oberflächenwiderstand nach VDE-Vorschrift Vergleichszahl
			50 Hz	800 Hz	$10^6$ Hz	50 Hz	800 Hz	$10^6$ Hz	
Marmor . . . . .	bis $10^{10}$	25—50	8	—	—	—	—	—	8—11
Schiefer . . . . .	bis $10^8$	2—4	6—10	—	—	—	—	—	8
Quarz, kristallin . . . . .	$10^{13}$	—	4,5—4,9	—	—	—	—	—	—
Quarz, geschmolzen . . . . .	$10^{17}$	200	3,5—4,2 <sup>1</sup>	4,2	—	—	<0,5	—	13
Glimmer . . . . .	$10^{14}$ — $10^{17}$	500	7	—	—	—	0,6	—	>12
Bernstein . . . . .	> $10^{16}$	520—750	2,7—2,8	2,8	—	—	0,5—1,2	5	—
Basalt . . . . .	$10^7$ — $10^{13}$	40	9	—	—	—	40—70	—	>10
Hölzer . . . . .	—	3—20	—	1,1—4,3	—	—	—	—	—
Hölzer, imprägniert . . . . .	—	40—60	—	—	—	—	—	—	—

<sup>1</sup> Je nach Reinheitsgrad.

Tabelle 49<sup>1</sup>. Umrechnungstafel für Wärmeleitungseinheiten.

	gcal/cm s °C	kcal/m h °C	W/cm °C	B.T.U in/squ. ft s °F	B.T.U in/squ. ft h °C	B.T.U/ft h °F	Joule/m h °C
gcal/cm s °C . . . . .	1	360,0	4,186	0,8064	2903	241,9	$1,508 \cdot 10^6$
kcal/m h °C . . . . .	0,002778	1	0,01163	0,002240	8,065	0,6720	$4,189 \cdot 10^3$
Watt/cm °C . . . . .	0,2389	86,00	1	0,1926	693,5	57,79	$3,602 \cdot 10^6$
B.T.U in/squ. ft s °F . . . . .	1,240	446,4	5,191	1	3600	300	$1,870 \cdot 10^6$
B.T.U in/squ. ft h °F . . . . .	0,003445	0,1240	0,001442	0,0002778	1	0,08333	519,5
B.T.U/ft h °F . . . . .	0,004134	1,488	0,01730	0,003333	12,00	1	$6,234 \cdot 10^3$
Joule/m h °C . . . . .	$6,631 \cdot 10^{-7}$	$0,2387 \cdot 10^{-3}$	$2,776 \cdot 10^{-6}$	$5,347 \cdot 10^{-7}$	$1,9249 \cdot 10^{-3}$	$0,16040 \cdot 10^{-3}$	1

<sup>1</sup> Mittlere Kalorien, mittlere Britische Wärme-Einheiten und absolute Watt liegen der Tabelle zugrunde.

## Sachverzeichnis.

Alle Firmenbezeichnungen sind in schräger Schrift gedruckt.

- A, Typ — 8.  
Ableitung eines Kondensators 94.  
Abnahme 286.  
Abreißfunken 160.  
Absorptionsindex 100, 257.  
Absorptionskoeffizient 100, 257.  
*Acronal*, Identifizierung 25.  
Äther, Identifizierung 24.  
Äthylalkohol, Prüfung auf Verhalten gegen — 278.  
Äthylazetat, Prüfung auf Verhalten gegen — 278.  
Äthylendichlorid, Prüfung auf Verhalten gegen — 278.  
Äthylzellulose, Bedeutung im Vergleich zu anderen Zellulose-Abkömmlingen 8.  
— Eigenschaftstabellen 300—309.  
— Identifizierung 24.  
Ätzen von Schliffen 35, 260.  
Ätzversuche an Kunststoffen 31.  
Akrylate, kalter Fluß 190.  
*Albertol*, Identifizierung 25.  
— *III L*, Identifizierung 25.  
Alkalibeständigkeit 309.  
Alkaligehalt, Bestimmung in Preßspan 21.  
*Alkydale*, Identifizierung 25.  
Alkylpolysulfide, Identifizierung 23, 26.  
Alkylzellulose, Identifizierung 23.  
Alkohollösliche Bestandteile, Bestimmung in Preßspan 21.  
*Alloprene*, Identifizierung 26.  
Alterung bei Weichgummi 7, 309.  
— künstliche 289.  
Alterungsschutzmittel 7.  
Aluminiumoxyd 4.  
Amber-Glimmer 2.  
Amerikanische Vorschriften 54, 75, 79, 175, 180, 185, 188, 189, 207, 222, 238, 267, 270, 278.  
American Standards for Testing Materials (A.S.T.M.), Festlegung der Prüfverfahren in — 17.  
Aminoplaste 9.  
Ammoniak 278.  
Ammoniakdampf, Beständigkeit gegen 277.  
Ammonium-Hydroxyd, Prüfung auf Verhalten gegen — 278.  
Analyse, anorganischer Isolierstoffe 18.  
— Bedeutung 17.  
— chemische 17.  
— organischer Isolierstoffe 19.  
Anilin-Formaldehyd-Kondensate, Eigenschaftstabellen 300—309.  
Anilin-Formaldehyd-Kondensate, Identifizierung 26.  
Anilinharz, Eigenschaftstabellen 300—309.  
Anorganische Isolierstoffe 2.  
Anschlüsse 33, 260.  
Anwendungsformen der Isolierstoffe 13.  
Arbeitsaufnahme 177.  
*Ardoxan*, Eigenschaftstabellen 292—299, 312.  
Asbest, Einteilung, Eigenschaften und Verwendung der Asbestsorten 3.  
— Verwendung für Isolierstoffe 6.  
— Analyse 19.  
— Lichtbogenfestigkeit 159.  
Asche, Bestimmung in Isolierlacken 22.  
— — Kabelmassen 29.  
— — Preßspan 21.  
Asphalt 6.  
*Astralon*, Identifizierung 27.  
Ausdehnungsmessung 230.  
Ausbröckeln, Prüfung auf — 37.  
Aushärtungsgrad, Bestimmung 22.  
*AW2-Harz*, Identifizierung 25.  
Azetale, Identifizierung 25.  
Azeton, Prüfung auf Verhalten gegen — 278.  
Azetonlösliche Bestandteile, Bestimmung in Gummi 20.  
— — — in Phenolkunstharz-Preßmassen und -Preßlingen 22.  
Azetylzellulose, spez. Isolationswiderstand von — in Abhängigkeit von der Temperatur 85.

- Balata, Verwendung für Isolierstoffe 6.  
 Ballistische Konstante des Galvanometers 80.  
 Baumwolle, Verwendung für Isolierstoffe 6.  
 Bearbeitbarkeit, Prüfverfahren zur Beurteilung der — 36, 304.  
*Beckazite*, Identifizierung 25.  
 Benzin, Prüfung auf Verhalten gegen — 278.  
 Benzylzellulose, Bedeutung im Vergleich zu anderen Zelluloseabkömmlingen 8.  
 — Identifizierung 24.  
 — kalter Fluß 190.  
 BERA 37.  
 Berechnung von Kapazitäten 91.  
 Bernstein 6, 90, 256, 314.  
 Beschleuniger, Bestimmung in härtbaren Preßmassen 27.  
 Betriebskapazität 107.  
 Bewertung 283.  
 Biegefestigkeit 196, 254, 297, 305.  
 — von Isolierpreßstoffen 15.  
 Biege-Mikanit, Unterscheidung von anderen Mikanit-Sorten 3.  
 Biegeversuch 196.  
 — in der Wärme 236.  
 Bifilare Leitungsführung 118.  
 — Schleifdrahtwiderstände 106.  
 Bitumen, Verwendung für Isolierstoffe 6.  
 Bleiborat, Verwendung für Typ Y 5.  
 Blindleistung 95.  
 Blindstrom 95.  
 Blindwiderstand 99.  
 Blockglimmer, Unterscheidung von anderen Glimmer-Sorten 3.  
 BRAUNSCHE Röhre 113.  
 Brechungsexponent 100, 255.  
 Brennbarkeit 246.  
 Brennpunkt 244, 246.  
 Brenntemperatur 293.  
 Britische Normen 22, 222, 267, 251.  
 — Vorschriften 37, 48, 49, 50, 74, 157, 185, 190, 207, 221, 238, 270.  
 British Standard Specifications 17.  
 Bruch, spröder, beim Druckversuch 187.  
 Bruchdehnung 177, 305.  
 Bruchspannung 177.  
 Brückenordnung nach HARTSHORN 119.  
 — nach ZICKNER 119.  
 Brückenschaltung mit sehr hohen Vergleichswiderständen 84.  
 Brückenverzweigung 100.  
 Brücke der British Thomsen Houston Co. Ltd. 129.  
 — für Kapazitäts- und Widerstandsmessungen der N. V. Philip's Gloeilampenfabriken 130.  
 — mit Hilfszweig 119.  
 — mit Parallelwiderstand zu dem Prüfling  $C_x$  135.  
 — mit Selbstinduktion 124.  
 — mit selbsttätigem Abgleich 137.  
 — nach BORMANN und SEILER 116.  
 — nach GIEBE und ZICKNER 117.  
 — nach SCHERING 114, 126.  
 — nach WIEN 122, 135.  
 B.S.S. 222.  
 bulk factor (Verdichtungsfaktor) 50.  
*Buna* 12.  
 — Identifizierung 24.  
 Butadien-Polymerisat 12.  
  
*Calan*, Eigenschaftstafeln 292—299.  
*Calit* 4.  
 — Eigenschaftstafeln 292—299, 312.  
*Cellon*, Identifizierung 25.  
*Cellit*, Identifizierung 25.  
 centisthène 182.  
 Chemikalien, Beständigkeit gegen — 276.  
 Chemische Beständigkeit 298.  
 — Eigenschaften 309.  
 — Prüfungen 263.  
 — Verunreinigungen, Bestimmung der — — in Isolierlacken 21.  
 — Zusammensetzung 17.  
 Chlor, Bestimmung in Kabelmassen 30.  
 Chlorkautschuk, Eigenschaftstafeln 300—309.  
 — Identifizierung 23, 26.  
 Chloroformlösliche Bestandteile, Bestimmung in Gummi 20.  
*Cibanit*, Identifizierung 26.  
*Colloresin*, Identifizierung 24.  
*Condensa* 5.  
 — Eigenschaftstafeln 292—299, 312.  
 $\cos \varphi$  93.  
 cup flow test 48.  
*Cuprophane*, Identifizierung 24.  
  
 Dämpfungskoeffizient 97.  
 Dämpfungsfaktor 97.  
 Dämpfungszahl 97.  
*Dartex*, Identifizierung 26.  
 Dauerbiegefestigkeit 226.

- Dauerbiege-Versuch 225.  
 Dauerdruck-Versuch 225.  
 Dauerprüfmaschine 227.  
 Dauerspannungsprüfung 156.  
 Dauerstandversuche 224.  
 Dauerversuche 224.  
 Dauer-Wärmebeständigkeit 252.  
 Dauerzug-Versuch 225.  
*Decelith*, Identifizierung 27.  
 Defo-Gerät 38.  
 Dehnung 176, 305.  
 Deutsche Normen 189.  
 — Vorschriften 52, 72, 181, 182, 184, 189, 195, 203, 219, 237, 249, 267, 268, 276.  
 Deutscher Verband für die Materialprüfungen der Technik 20.  
 Dezimal-Klassifikation 13.  
 Dichte, Bestimmung und Bedeutung 174.  
 Dicke, Vorschrift über Dickenmessung bei Glimmer-Erzeugnissen 173.  
 Dickenmessung 174.  
 Dielektrische Messungen bei konstanter relativer Luftfeuchtigkeit 165.  
 — — in Abhängigkeit vom Druck 164.  
 — Verlustleistung 95.  
 Dielektrischer Verlustfaktor 93, 147, 295, 303, 312, 314.  
 — — einer Kombination mehrerer Kapazitäten 99.  
 — Verlustwinkel 94.  
 Dielektrizitätskonstante 60, 90, 92, 100, 147, 295, 303, 314.  
 — bei Hochfrequenz 147, 148.  
 Dielkometer 149.  
*Dioxan* 149.  
 DK, Dezimal-Klassifikation 13.  
 Drehkondensatoren mit verschiedenem Änderungsgesetz 109.  
 Dreiplattenkondensator 91.  
 Druckfestigkeit 186, 297, 305.  
 — nach Wärmebeanspruchung 251.  
 Druckspannung 186.  
 Druckversuch 186.  
 — in der Wärme 241.  
 Dünnschliffe 33, 260.  
 Durchbiegung 196, 197, 199.  
 — in der Wärme 237, 238, 239.  
 Durchgangswiderstand 77.  
 Durchlässigkeit für Wasser und Wasserdampf 272.  
 Durchlässigkeitskoeffizient 257.  
 Durchschlagsfestigkeit 154, 295, 303, 314.  
 Durchschlagsspannung 149.  
 — in Abhängigkeit von der Beanspruchungsdauer 154.  
 — — von der Dauer der Spannungsbeanspruchung 150.  
 — — von der Frequenz 153.  
 — — von der Kurvenform 153.  
 — — von der Polarität 154.  
 DVM 20.  
 Dynstat-Gerät nach SCHOB-NITSCHESALEWSKI 200, 205, 211, 212, 218.  
 — Schlagbiegeversuch 220.  
 — Sonderprüfkörper 50.  
 Dynstat-Tafel nach PINTEN 51.  
 Eigenschaftstabern 291.  
 Eindringvermögen, Bestimmung an Isolierlacken 36.  
 Eindruckversuch 191.  
 — in der Wärme 242.  
 Eiweiß-Abkömmlinge, Eigenschaftstabern 300—309.  
 Eiweiß-Kondensationsprodukte, Identifizierung 26.  
 Elastizitätsmodul 177, 196, 198, 199, 305.  
 — Ermittlung 203.  
 Elektrische Eigenschaften von Isolierstoffen in Zahlentabern 85, 90, 147, 295, 303, 312, 314.  
 — — in Abhängigkeit von der Temperatur 162.  
 — Feldstärke 90.  
 Elektroden 61.  
 — aufgegonnene 63.  
 — aus Woodschem Metall 63.  
 — eingebrannte Silber- oder Platinbelegungen 62.  
 — für die Bestimmung des Oberflächenwiderstandes 67.  
 — — — nach amerikanischen Vorschriften 75.  
 — — — nach französischen Vorschriften 76.  
 — — des dielektrischen Verlustfaktors, der Dielektrizitätskonstanten und des spezifischen Isolationswiderstandes 66.  
 — für die verschiedenen Isolierstoffgruppen 64.  
 — für Formkörper 68.  
*Elektrogomme*, Identifizierung 26.

- Elektrometer für Isolationsmessungen 85.  
 — für Verlustmessungen 140.  
 Elektrometerempfindlichkeit 84.  
 Elektrometrische Meßverfahren 82.  
 Elfenbein 90.  
*E*-Modul siehe Elastizitätsmodul.  
 Empfindlichkeit von Brückenschaltungen 127.  
 Energieverlust 93.  
 Erdkapazitäten 115.  
*Ergan*, Eigenschaftstafeln 292—299.  
 Ersatzschaltungen 94.  
 Erweichungspunkt 299.  
 Erweiterte SCHERING-Brücke 116.  
 Entflammbarkeit 245.  
 Entzündbarkeit 246.  
 Essigsäure, Prüfung auf Verhalten gegen 278.  
*Exluan* 149.  
  
 Fadenkabel 116.  
 Färben von Schliften 35, 260.  
 Farbton 259.  
 Falzer 225.  
 Falzversuch 225.  
 Faserstoff, Verwendung für Isolierstoffe 6.  
 Feldverteilung 153, 155.  
 Fertigstückprüfung, Biegeversuch 205.  
 Festigkeit 176.  
 Feuchtigkeit, Bestimmung in Gummi 20.  
 — — in Kabelmassen 29.  
 — — in Preßspan 21.  
 — Einfluß auf Kerbzähigkeit 215.  
 Feuerfestigkeit 299.  
 Feuersicherheit 246.  
 Fiber 7.  
 FICKSches Gesetz 272.  
 Flachbiegemaschine, Bauart SCHENCK 227.  
 Flächendichte der elektrischen Ladungen 90.  
 Flammpunkt 244.  
 Fließgrenze 187.  
 Fließprüfgerät 41.  
 Fließvermögen 42, 45.  
 Folien, Bestimmung der Wasserdampfdurchlässigkeit 273.  
 — Eigenschaftstafeln 300—309.  
 — Prüfung auf Kältefestigkeit 250.  
 Formänderung 177.  
 — beim Druckversuch 189.  
  
 Formänderung, bleibende (plastische) 191, 194.  
 — elastische (federnde) 186, 191, 194.  
 — Gesamt- 194.  
 — in der Wärme 238.  
 Formänderungsvermögen 196, 197.  
 Formbarkeit 38.  
 Formgebung, keramische Stoffe 5.  
 — Polymerisate 12.  
 — Prüfverfahren 11, 35.  
 Formkörper 60.  
 Form-Mikanit, Unterscheidung von anderen Mikanit-Sorten 3.  
 Französische Vorschriften 21, 55, 76, 158, 181, 182, 188, 208, 223, 239, 246, 247, 271, 279, 280, 283.  
*Frequenta* 4.  
 — Eigenschaftstafeln 292—299.  
 Füllstoffe, Harzträger 10.  
 — Bestimmung der — in Kabelmassen 30.  
 — — in härtbaren Preßmassen 27.  
 — — in gehärteten Preßstoffen 28.  
 Fünfpolröhre 132.  
  
*Galalith*, Identifizierung 26.  
 Galvanometer, ballistisches 81.  
 Galvanometerschutz 88.  
 GAUSSsche Fehlerfunktion 169.  
 Gebrauchsprüfung 57, 202.  
 Gefügeuntersuchungen 30, 260.  
 Genauigkeit der Brückenanordnungen 133.  
 — der Messungen bei Hochfrequenz 143.  
 Geräteprüfung 202.  
 Gesamtladungsmenge 90.  
 Gesteine 2.  
 — Biegeversuch 204.  
 — Bestimmung der Wasseraufnahme 268.  
 — elektrische Eigenschaftswerte 314.  
 Gewicht 173.  
 Gieß-Porzellan, Probenherstellung 54.  
 Gläser, elektrische Eigenschaften 294, 295.  
 Glanz der Oberfläche 262.  
 Glanzmesser 262.  
 Glas 4.  
 Glasgespinst 4.  
 Gleichgewichtsbedingung 103.  
 Gleichmäßigkeit 202.  
 — Beurteilung der — 225.

- Gleichmäßigkeit von Isolierstoffen 16.
- Glimmer, Analyse 19.
- technisch wichtige Arten 2.
- Druckversuch 188.
- Verwendung für Typ Y 5.
- Wärmefestigkeitsprüfung 241.
- Glimmer-Asbest 3.
- Glimmer-Batist 3.
- Glimmer-Erzeugnisse, Dickenmessung 173.
- Glimmer-Kondensatoren 112.
- Glimmer-Lacktuch 3.
- Glimmer-Papier 3.
- Glimmer-Seide 3.
- Glimmlampe 87.
- Glühdornprüfgerät 243.
- Glühverlust, Bestimmung des — in Asbest 19.
- — in Glimmer 19.
- Glutfestigkeit 246, 299, 307.
- Glutolin, Identifizierung 24.
- Glutsicherheit 248.
- Glyptal, Identifizierung 25.
- Glyptalharz 10.
- Graphitelektroden 68.
- Gummi 6.
- Alterung von — 281.
- Ozonbeständigkeit von — 280.
- Guttapercha 6.
- Härtbare Kunstharze 9.
- Härte, Kugeldruckhärte 191, 259, 277, 305.
- Härtebegriff 193.
- Härtegrad 243.
- Härtung 11.
- Härtungsvermögen 45.
- Härtungszeit 45.
- Häufigkeitspolygon 168.
- Harnstoff-Formaldehydharz, Identifizierung 26.
- Harnstoff-Formaldehyd-Kondensate, Eigenschaftstabeln 300—309.
- Harnstoff-Formaldehyd-Kondensationsprodukte 23.
- Identifizierung 26.
- Harnstoffharz-Preßmassen, Analyse 28.
- Harnstoffharz-Preßstoffe, kalter Fluß 190.
- Kochprüfung 276.
- Hartform-Mikanit, Unterscheidung von anderen Mikanit-Sorten 3.
- Hartgewebe (Übersicht über geschichtete Kunstharz-Preßstoffe) 10.
- Eigenschaftstabeln 300—309.
- Spaltbarkeit 194.
- Wärmebeständigkeitsprüfung 234.
- Wasseraufnahme 267.
- Hartgeweberohre 205.
- Hartgummi 7.
- Analyse 19.
- Biegefestigkeit 205.
- Eigenschaftstabeln 300—309.
- Identifizierung 26.
- kalter Fluß 190.
- Schlagbiegefestigkeit 219.
- Wärmefestigkeit 238.
- Hartpapier 7.
- Übersicht über geschichtete Kunstharz-Preßstoffe 10.
- Eigenschaftstabeln 300—309.
- Spaltbarkeit 194.
- Wärmebeständigkeitsprüfung 234.
- Wasseraufnahme 267.
- Hartpapier-Rohre 205.
- Hartporzellan 4.
- Eigenschaftstabeln 292—299, 312.
- Harz, Verwendung für Isolierstoffe 6.
- Harzester, Identifizierung 25.
- Harzträger 10.
- Heiz-Mikanit, Unterscheidung von anderen Mikanit-Sorten 3.
- Herstellung der Prüfkörper 52.
- Herstellungsfehler 276.
- Hilfsbrücke 130.
- Hilfsmittel für die Messung des Oberflächenwiderstandes und des Isolationswiderstandes 87.
- Hilfszweig für Hochspannungsbrücken 120.
- Histogramm 168.
- Hochfrequenzmessungen 123.
- Hochohmwiderstände nach F. KRÜGER 84.
- Hochspannungskondensatoren 110.
- Hochspannungspreßgaskondensatoren 111.
- Hochspannungsvoltmeter 152.
- Höchstemperaturen, zulässige — bei dauernder und kurzzeitiger Wärmebeanspruchung 253.
- Hohlkugel, Kapazität einer — 78.
- Holz, Verwendung für Isolierstoffe 6.
- Kunstharz-Preßholz (Übersicht über geschichtete Kunstharz-Preßstoffe) 10.

- Holz, elektrische Eigenschaftswerte 314.  
 Holzöl, Verwendung für Isolierstoffe 6.  
 Hornblende-Asbeste, Kennzeichnung 3.  
 HOUWINK-Plastometer 44.  
 Hydrokautschuk, Eigenschaftstafeln 300—309.  
 Hydrozellulose, Identifizierung 23.  
 Hydrostat 165.
- Identifizierung von Isolierstoffen 18.  
*Igelit* 11.  
 — Identifizierung 27.  
 Impedanz 96.  
 Inhomogene Isolierstoffe 153.  
 Innendruckversuch 185.  
 Internationaler Verband für die Materialprüfungen der Technik 17.  
*Irgonit*, Identifizierung 26.  
 Irreversible Wärmedehnzahlen 230.  
 Isolations-Kriechströme 73, 78.  
 Isolationswiderstand 70.  
 — spezifischer 60, 71.  
 — unabgeschirmter Anordnungen 81.  
 Isolierlacke, Analyse 21.  
 — Alterung 283.  
 — Angriff auf Kupfer 280.  
 — Prüfung 35.  
 Isolierpreßstoffe, Biegefestigkeit 15.  
 — Biegeversuch 208.  
 — Brennbarkeit 247.  
 — Bruchgefahr und relative Feuchtigkeit 214.  
 — Druckversuch 189.  
 — Oberflächenwiderstand 74.  
 — Probenherstellung 55.  
 — Schlagbiegeversuch 221.  
 — Typisierung 284.  
 — Überwachung 284.  
 — Verhalten gegen Mineralöl 279.  
 — Wärmefestigkeit 238.  
 — Wasseraufnahme 267.  
 Isolierstoffe, anorganische 2.  
 — — Naturstoffe 2.  
 — aus anorganischen Naturstoffen aufgebaute 4.  
 — aus niedrigmolekularen Naturstoffen aufgebaute 9.  
 —, elektrotechnische, Begriff 1.  
 — feste, Biegeversuch 207.  
 — — Schlagbiegeversuch 219.  
 — härtbare, Biegeversuch 203.  
 — von hochmolekularen Naturstoffen abgewandelte 6.
- Isolierstoffe, keramische, Porosität 175.  
 — organische 5.  
 — — Wärmefestigkeitsprüfung 237.  
 Ionenleitfähigkeit 90.
- Jute, Verwendung für Isolierstoffe 6.
- Kabelisolierfolie, nachchloriertes Polyvinylchlorid als — 11.  
 Kabelisoliermasse, spezifischer Isolationswiderstand von — 85.  
 Kabelmantel, Bestimmung der Wasserdampfdurchlässigkeit 274.  
 Kabelöl 6.  
 Kabelphantom 85.  
 Kältefestigkeit 249, 250.  
 Kali-Glimmer, chemische Zusammensetzung 2.  
 Kalorimeter, Dampf- 234.  
 Kalorimetrisches Meßverfahren 140.  
 „Kalter Fluß“ 190.  
 Kapazität 90.  
 — einer Kombination mehrerer Kapazitäten 99.  
 — von Glimmerkondensatoren in Abhängigkeit von der Frequenz und Temperatur 112.  
 Kapazitätsarme Kabel 116.  
 Kapazitive Spannungsteilung 116.  
 Kapazitiver Gleichspannungs-Umformer 87.  
 Kartonfalzer 226.  
 Kaseinharz, Brechungsindex 256.  
 Kathodenzerstäubung 62.  
 Kautschuk, Alterung 281.  
 — Messung der Plastizität 6, 38.  
 — vulkanisiert, Identifizierung 26.
- Kerajar* 5.  
 — Eigenschaftstafeln 292—299.  
 Keramische Isolierstoffe 4.  
 — — Biegeversuch 204, 207.  
 — — Bestimmung der Wasseraufnahme 269, 270, 292.  
 — — Druckversuch 188.  
 — — Durchschlagsspannung 152, 156.  
 — — Probenherstellung 54.  
 — — Saugfähigkeit, Ermittlung der 269.  
 — — Schlagbiegeversuch 219, 222.  
 — — Temperaturwechselbeständigkeit 251.



- Keramische Isolierstoffe, dielektrischer Verlustfaktor 147, 295, 312.  
 — — Wechselstromwiderstand in Abhängigkeit von der Temperatur 152, 312.  
 — — Wirkung der Wärme auf die mechanische Festigkeit 251.  
 — Stoffe, Formgebung 5.  
 — — Härteprüfung 193.  
 — — Zugversuch 180.  
 Kerbeinflußzahl 210.  
 Kerbschärfe 213.  
 Kerbzähigkeit 210, 214, 219, 221, 305.  
 — Feuchtigkeitseinfluß auf die — 215.  
 KIRCHHOFFSche Gleichungen 92.  
 Klassenhäufigkeit 168.  
 Klassifizierung 284.  
 — nach dem Fließvermögen 42.  
*K.M.-Harz*, Identifizierung 26.  
 Kochprüfung 276.  
 Kohlenstoff-Tetrachlorid, Prüfung auf Verhalten gegen — 278.  
 Kolloidales Graphit 63.  
 Kolophonium, Verwendung für Isolierstoffe 6.  
 — Identifizierung 23.  
 Kolophonium-Glycerinester 23.  
 — Identifizierung 25.  
 Kolophonium-Maleinsäure-Glycerinester, Identifizierung 26.  
 Kolophonium-Phenolaldehydester, Identifizierung 23.  
 Kommutator-Mikanit, Unterscheidung von anderen Mikanit-Sorten 3.  
 Kompensationsanordnungen 136.  
 Kompensationsverfahren zur Messung hoher Isolationswiderstände 83.  
 Kompensatoren 135.  
 Komplexe Symbole 103.  
 Kondensatoren 106.  
 — mit festem Dielektrikum 112.  
 — ohne Anfangskapazität 109.  
 Konditionierung 215.  
 Konus 78.  
 Kopal, Verwendung für Isolierstoffe 6.  
 — Brechungsindex 256.  
 Koronabeständigkeit 280.  
 Kratzfestigkeit 259.  
 Kreisfrequenz 97.  
 Kreiszyklen, MAXWELLSche 101.  
 Kresol-Formaldehyd-Kondensationsprodukte, Identifizierung 24.  
 — Brechungsindex 256.  
 Kriechen 224.  
 Kriechstromfestigkeit 60, 160.  
 Kugeldruck-Härte 191, 305.  
 Kumaronharze, Identifizierung 24.  
 Kunstharz, Bestimmung des — in härtbaren Preßmassen 27.  
 — — des — in gehärteten Preßstoffen 28.  
 — dielektrische Eigenschaftswerte bei Hochfrequenz 147.  
 — härtpbares, Kennzeichnung 9.  
 Kunstharz-Preßholz (Übersicht über geschichtete Kunstharz-Preßstoffe) 10.  
 Kunstharz-Preßmassen, Formbarkeit 44.  
 — Verfahren für die Prüfung der Verarbeitbarkeit härtbarer — 44.  
 — Überwachung 289.  
 Kunstharz-Preßstoffe, Ätzversuche 32.  
 — Ermittlung des Elastizitätsmoduls 202.  
 — Einfluß des Feuchtigkeitsgehaltes auf die mechanischen Eigenschaften 215.  
 — Formänderung in der Wärme 238.  
 — Formgebung 11.  
 — Gefügeuntersuchung, mikroskopische 32, 260.  
 — geschichtete, Übersichtstafel 10.  
 — aus Harnstoffharzen 32.  
 — Kochprüfung 276.  
 — Kondensate 11.  
 — nichtgeschichtete, Übersichtstafel 10.  
 — Normalprüfkörper 51.  
 — Oberflächenwiderstand 72.  
 — aus Phenolharzen 32.  
 — Schlagbiegeversuch 222.  
 — Spannungs-Dehnungs-Schaubild 177.  
 — Zugversuch 184.  
 Kunstkautschuk 12.  
 — Biegeversuch 205.  
 Kunststoffe, Analyse 22.  
 — Ätzversuche 31, 260.  
 — Beständigkeit 272.  
 — Eigenschaftstabellen 300—309.  
 — harte 184.  
 — in der Kabeltechnik, Analyse 28.  
 — Löslichkeit 277.  
 — nichthärtbare —, Bestimmung der Plastizität 41.  
 — — Biegeversuch 205.  
 — — Schlagbiegeversuch 219.  
 — organische, Chemikalien-Beständigkeit 278.  
 — — künstliche Alterung 283.

- Kunststoffe, organische, Wasseraufnahme 272.  
 — Prüfung auf Kältefestigkeit 250.  
 — Polymerisate 11, 12.  
 — weichgummiartige, Zugversuch 183.  
 Kunsthorn, Identifizierung 26.  
 Kupfer 280.  
 Kurvenform 151, 152, 153.  
 Kurzprüfung, Wert der — 16.  
 Kurzzeichen für Isolierstoffe 13.
- Lackleinen, Bestimmung der Entzündbarkeit 246.  
 — Zugversuch 181.  
*Leatheroid*, Herstellung 7.  
 Leinen, Verwendung für Isolierstoffe 6.  
 Leinöl, Verwendung für Isolierstoffe 6.  
 Leistungsfaktor 93.  
 Leistungswinkel  $\varphi$  93.  
 Leitende Belegungen 61.  
 Leitender Lack 63.  
 Leitfähigkeit 70.  
 — der Oberfläche 70, 72.  
 Licht, Einfluß von — 309,  
 Lichtbeständigkeit 259.  
 Lichtbogenfestigkeit 159, 247.  
 Lichtdiffusion 259.  
 Lichtdurchlässigkeit 257, 262.  
 Lichtschnittverfahren 260.  
 Löslichkeit 277.  
 Lösungsmittel, Einfluß von — 309.  
 — Bestimmung in Isolierlacken 21.  
 Logarithmisches Dämpfungsdekrement 97.  
*Lutanol*, Identifizierung 24.  
*Luvican* 12, 85.  
 — Identifizierung 26.
- Magisches Auge 131.  
 Magnesia-Glimmer, chemische Zusammensetzung 2.  
 Magnesiumoxyd, Verwendung 4.  
 magnesiumsilikathaltige keramische Isolierstoffe 4, 292—299, 314.  
 Marmor 90, 314.  
 — Wasseraufnahmebestimmung 268.  
 Marzetti-Apparat 39, 40.  
 — System BEHRE 39.  
 Maß 173.  
 Maßeinheiten, Umrechnungstabellen für 310—314.
- Maßsystem, elektrostatisches und elektromagnetisches 92.  
 McLeod-Porosimeter 175.  
 Mechanische Eigenschaften 297, 305.  
 — Festigkeit 251.  
 — Prüfungen 173.  
 Megohmmeter 89.  
 Meßbrückenstöpsel 68.  
 Meßsender, Laboratoriums- 114.  
 Meßwandler 151.  
*Metacral*, Identifizierung 25.  
 Metallfolie 61.  
 Metallspritzverfahren nach SCHOOP 62.  
 Methyl-Methakrylat-Polymerisate, Eigenschaftstabellen 300—309.  
 Mikanit 3.  
 — Batist, Kennzeichnung 3.  
 — Leinen, Kennzeichnung 3.  
 — Papier, Kennzeichnung 3.  
 — Seide, Kennzeichnung 3.  
 Mikroskopische Gefügeuntersuchung 32, 260.  
 Mindestwerte 172, 268.  
 Mineralische Bestandteile, Bestimmung in Gummi 20.  
 Mineralöl 6.  
 — Beständigkeit von — 276.  
 — Prüfung auf Verhalten gegen — 279.  
*Mipolam*, Identifizierung 27.  
*Mipolam MP* 12.  
 — *PCU* 11.  
 Mischpolymerisat 12.  
 — Analyse, quantitative 29.  
 — Identifizierung 26, 27.  
 Mittelwert 169.  
 Momentanspannung 150.  
*Mooney-Plastometer* 44.  
*Mowilith*, Identifizierung 25.  
*Mowital*, Identifizierung 25.  
*MP*, Analyse 30.  
 — Eigenschaftstabellen 300—309.  
 Muskowit-Glimmer, chemische Zusammensetzung 2.  
*Mycalex* 159.  
*Mycalex*, Kennzeichnung 5.  
 — Eigenschaftstabellen 292—299.  
 myriapiëze 188.
- N, Typ — 8.  
 Nachwirkung 191, 204.  
 — elastische 224.  
 — plastische 224.

- Natriumchlorid, Prüfung auf Verhalten gegen — 278.
- Natriumhydroxyd, Prüfung auf Verhalten gegen — 278.
- Natriumkarbonat, Prüfung auf Verhalten gegen — 278.
- Natur-Gesteine 2, 64, 204, 314.  
— Biegeversuch 204.  
— Wasseraufnahmebestimmung 268.
- Naturkautschuk 7.  
— Identifizierung 24.  
— Vulkanisate 177.  
— vulkanisiert 281.
- Naturstoffe, organische 26.  
— Eigenschaftstafel 314.
- Negative Zeitkonstante 105.
- Nekal* 161.
- Nichtkeramische, gummifreie Isolierstoffe 9.  
— siehe auch Kunstharz-Preßstoffe, Isolierpreßstoffe.
- Nitrozellulose, Identifizierung 23, 26.
- Normalkondensator ohne Anfangskapazität 118.
- Normalkondensatoren 107.
- Normal-Pendelschlagwerk nach CHARPY 215.
- Normal-Prüfkörper 51.
- Normalstab 203, 210, 214.
- Normale Versuchsbedingungen 81.
- Normring, Weichgummi 183.
- Normstab, Weichgummi 183.
- Novolak, Identifizierung 23.
- Nullinstrumente 113.
- Oberfläche, Rauigkeit** 176.
- Oberflächenleitfähigkeit 72, 90.
- Oberflächenwiderstand 60, 70, 268, 295, 303.  
— Prüfvorschriften 72.  
— Vergleichszahlen 73.  
— von Hartpapierplatten 74.
- Ölsäure, Prüfung auf Verhalten gegen — 278.
- Olsen-Bakelite-Fließprüfer 41, 46.
- Oppanol* 12.  
— Identifizierung 24.
- Optische Homogenität 257.  
— Oberflächeneigenschaften 259.
- Optischer Ausdehnungsmesser 230.
- Organische Isolierstoffe 5.
- Organische Kunststoffe, nichthärtbare, Messung der Plastizität 38.
- Oxyde 4.
- Ozonbeständigkeit von Gummi 280.
- Papier, Verwendung für Isolierstoffe 7.
- Parallelwiderstandsbrücke mit Hilfszweig 135.
- PC*, Analyse 30.  
— Eigenschaftstafeln 300—309.
- PCU*, Analyse 30.  
— Eigenschaftstafeln 300—309.
- Pech, Verwendung für Isolierstoffe 6.
- Pendelschlagwerk nach CHARPY 215, 223.  
— nach IzOD 218.  
— nach SCHOB-NITSCHKE-SALEWSKI 218.
- Penetration, Bestimmung an Isolierlacken 36.
- Perbunan*, Identifizierung 26.
- Pergut*, Identifizierung 26.
- Pflanzenöl, Verwendung für Isolierstoffe 6.
- Phasenempfindliche Indikatoren 135.
- Phasenverschiebung 152.
- Phenol-Formaldehydharz, Identifizierung 23.
- Phenolformaldehyd-Kolophoniumester, Identifizierung 25.
- Phenolformaldehyd-Kolophoniumglyzerinester, Identifizierung 25.
- Phenol-Formaldehyd-Kondensate, Eigenschaftstafeln 300—309.  
— Brechungsindex 256.
- Phenol-Formaldehyd-Kondensationsprodukte, Identifizierung 24.
- Phenol-Furfuröl-Kondensate, Eigenschaftstafeln 300—309.
- Phenolgußharz, Brechungsindex 256.  
— kalter Fluß 190.
- Phenolharz-Preßstoffe, Formänderung in der Wärme 238.  
— Bestimmung der Wasseraufnahme 270.
- Phenol-Kunstharz-Preßstoff, Einfluß des Feuchtigkeitsgehaltes auf die mechanischen Eigenschaften 215.
- Phenoplaste 9.
- Philips*-Werkzeug 52.
- Phlogopit-Glimmer, chemische Zusammensetzung 2.
- Phosphorsäureester, Identifizierung 26.

- Phthalsäureester, Identifizierung 23.  
 Phthalsäure-Fettsäureglyzeride,  
 Identifizierung 25.  
 Phthalsäure-Glycerinester,  
 Identifizierung 25.  
 Physikalisch-chemische Eigenschaften  
 308, 309.  
 Physikalische Konstanten 229.  
 Piezoquarz 149.  
*Pioloform*, Identifizierung 25.  
 plastic yield 238.  
 Plastische Verformung 187.  
 Plastizität 38.  
 Plastograph, Brabender 44.  
 Plastometer 39, 44, 190.  
*Plastopal*, Identifizierung 26.  
 Plattendruckgeräte 38.  
 Plattenkondensator 77.  
 Plattenplastometer 190.  
 Plattenschutzringkondensator 91.  
*Plexigum* 12.  
 — Eigenschaftstabeln 300—309.  
 — Identifizierung 25.  
*Plexitol*, Identifizierung 25.  
 Polarisation 70.  
 Polarität bei Durchschlagmessungen  
 154.  
*Pollopas*, Identifizierung 23, 26.  
 Polyakrylate, Brechungsindex 256.  
 Polyakrylnitril, Identifizierung 24.  
 Polyakrylsäureester, Identifizierung 23,  
 25.  
 — Löslichkeit 277.  
 Polyakrylsäurenitril, Identifizierung 26.  
 Polybutadien, Identifizierung 24.  
 Polyisobutylen 12.  
 — Identifizierung 23.  
 — Löslichkeit 277.  
 Polykondensate 9.  
 — Analyse 22.  
 — Eigenschaftstabeln 300—309.  
 — Formgebung 44.  
 Polymere Kohlenwasserstoffe,  
 Identifizierung 24.  
 Polymerisate 117, 11.  
 — Analyse 22.  
 — Eigenschaftstabeln 300—309.  
 — Formgebung 12.  
 Polymerisationsgrad, Bestimmung des —  
 30.  
 Polymethakrylsäureester, Identifizie-  
 rung 23, 25.  
 — Löslichkeit 277.  
 Polymethakrylsäure-Methylester 12.  
 Polystyrol 11.  
 — Brechungsindex 256.  
 — Identifizierung 23, 24.  
 — kalter Fluß 190.  
 — Löslichkeit 277.  
 Polyvinyläther, Identifizierung 24.  
 Polyvinyl-Carbazol 12.  
 — Löslichkeit 277.  
 Polyvinylchlorid 11.  
 — Analyse, quantitative 29.  
 — Chemikalien-Beständigkeit 278.  
 — Identifizierung 23, 24, 27.  
 — nachchloriertes 11.  
 Polyvinylmethyläther, Identifizierung  
 24.  
 Polyvinylazetale, Identifizierung 25.  
 Polyvinylazetat, Identifizierung 25.  
 Polyvinylverbindungen 12.  
 Porenvolumen 175.  
 Porosimeter 175.  
 Porosität 175, 266, 297.  
 Preßbernstein siehe Bernstein.  
 Preßdruck 301.  
 Preßfehler, Nachweis 32.  
 Preßgaskondensatoren 111.  
 Preßharz, Eigenschaftstabeln 300—309.  
 Preßmassehersteller 287.  
 Preßmassen, Analyse, quantitative 27.  
 — härtbare 27.  
 — Klassifizierung 42.  
 — Überwachung 289.  
 Pressereien 287.  
 Preßspan 7.  
 — Analyse 21.  
 — Falzversuch 225.  
 — Zugversuch 182.  
 Preßstoffe 292.  
 — Biegeversuch 208.  
 — Brennbarkeitsbestimmung 247.  
 — Druckversuch 189.  
 — Einfluß des Feuchtigkeitsgehaltes  
 auf die mechanischen Eigen-  
 schaften 215.  
 — geschichtete (Übersichtstafel) 10.  
 — Kochprüfung 276.  
 — nichtgeschichtete, Eigenschafts-  
 tafeln 300—309.  
 — — Kunstharz- 10.  
 — Phenolharz-, kalter Fluß 190.  
 — Verhalten gegen Mineralöl 279.  
 — Schlagbiegeversuch 221, 222.  
 — Überwachung 284.  
 — — Typisierung 288.

- Preßstoffe, Wasseraufnahmebestimmung 267, 270.  
 — Zusammenhang von Bruchgefahr und relativer Luftfeuchtigkeit 214.  
 Preßtemperatur 301.  
 Probenahme von Gummi 20.  
 Probenformen 50.  
 Proportionalitätsgrenze 187.  
 Proteinoplaste, Identifizierung 23.  
 Prüfgeräte für Biegeversuche 199.  
 — Glutfestigkeit 248.  
 — Kugeldruckhärte 192.  
 — Schlagbiegeversuche 215.  
 — Wärmefestigkeit 237, 238, 239, 240.  
 — Wasserdampfdurchlässigkeit 275.  
 — Zugfestigkeit 179.  
 Prüfkörper 50.  
 — für elektrische Untersuchungen 60, 152.  
 — für Wasseraufnahme 269.  
 Prüftransformator 150.  
 Prüfung, Aufgaben und Grenzen der 14.  
 Prüfverfahren 14.  
 — zerstörungsfreie — 166.
- Quarz 4, 90, 147, 314.  
 Quarzglas 4.  
 Quellung 263, 270.  
 Quetschgrenze 187.
- Randwirkung des elektrischen Feldes 115.  
 Rauigkeit, Prüfung auf — 176, 261.  
 Raumgewicht 297, 304.  
 — scheinbares spezifisches Gewicht 174.  
 Reflexionsvermögen 262.  
 Regeldrosseln 151.  
 Regeltransformator 151.  
 Registrierung der Leistung 140.  
 Resit, Identifizierung 23.  
 Resol, Identifizierung 23.  
 Resonanzanzeiger 142.  
 Resonanzbrücke 147.  
 Resonanzverfahren 141.  
*Resopal*, Identifizierung 26.  
 Resultierender Verlustfaktor 100.  
 Richtspannungsanzeiger 114.  
 Rippenbecher nach SCHOB 51.  
 Ritzhärte 193, 297.  
 Röhrengleichrichter 87.  
 Röhrenrelais 88.  
 Röhrenvoltmeter 146.
- Röntgendurchleuchtungen 31.  
 Rohre 205.  
 Rohrförmige Prüfkörper 77.  
 Rollenpreßspan 7.  
*Ronilla S.*, Identifizierung 24.  
 Ruhende Beanspruchung 224.  
 Rundrohre, gewickelte, Zugversuch 185.
- Säulendiagramm 168.  
 Säurebeständigkeit 309.  
 Säureester, Löslichkeit 277.  
 Säuregehalt, Bestimmung in Preßspan 21.  
 Säurezahl, Bestimmung in Isolierlacken 22.  
 Salpetersäure, Prüfung auf Verhalten gegen — 278.  
 Salzsäure, Prüfung auf Verhalten gegen 278.  
 Saugfähigkeit 269.  
 Schalteröle 6.  
 Scheinstrom 95.  
 Scheitelfaktor 151.  
 Scheitelwert-Meßgerät 152.  
 Schellack, Verwendung für Isolierstoffe 6.  
 Schering-Brücke 114, 126.  
 Schering-Brücken für Niederspannung und Mittelfrequenz 132.  
 Schichtstoffe, Eigenschaftstabellen 300 bis 309.  
 Schiefer 64.  
 — Eigenschaften 314.  
 — Wasseraufnahmebestimmung 268.  
 Schläuche, Prüfung auf Kältefestigkeit 250.  
 Schlagarbeit 209, 211.  
 Schlagbiegefestigkeit 210, 219, 221, 297.  
 — nach Wärmeeinwirkung 254.  
 Schlagbiegeversuch 209.  
 — nach CHARPY 213.  
 — nach IZOD 213.  
 — nach SCHOB-NITSCHÉ-SALEWSKI 213.  
 — Prüfung bei tiefen Temperaturen 249.  
 Schlagfestigkeit 305.  
 — Prüfung bei tiefen Temperaturen 249.  
 Schlaggeschwindigkeit 209, 217.  
 Schlagwerk nach CHARPY 215, 223.  
 — nach IZOD 218.  
 — nach SCHOB-NITSCHÉ-SALEWSKI 218.  
 Schläuche, Bestimmung der Wasserdampfdurchlässigkeit 274.

- Schleifdrahtabgleichung, Brücken mit — 106, 128.  
 Schließzeit 45, 48.  
 Schirmung 115.  
 Schlieren-Methode 257.  
 Schopper-Plastometer nach HOUWINK 39.  
 Schrumpfung 11.  
 — nach Wärmeeinwirkung 254.  
 Schüttgewicht 49.  
 Schutzringanordnung mit Quecksilber-  
 elektroden 67.  
 Schutzringelektroden 66.  
 Schutzringkondensator für flüssige Iso-  
 lierstoffe 85.  
 Schutzringschalter 81.  
 Schutzspaltbreite 67, 71.  
 Schwankungen der Eigenschaftswerte 61.  
 Schwefel, Bestimmung in Gummi 21.  
 Schwefelsäure, Beständigkeit gegen —  
 277.  
 — Prüfung auf Verhalten gegen — 278.  
 Schweizer Verfahren 242.  
 Schweizerischer Elektrotechnischer  
 Verein, Vorschriften 17, 77, 158.  
 Schwindung 11, 50, 301.  
 Schwingkontaktgleichrichter 135.  
 Schwingungsdauer 97.  
 Schwingungsfaktor 97.  
 SCOTT-Plastometer 39.  
 Segerkegel 293.  
 Seide, Verwendung für Isolierstoffe 6.  
 Selbstinduktionen in Verlustwinkelmeß-  
 brücken 124.  
 Selbstinduktion in den Zuleitungen 118.  
 Serpentin-Asbeste, Kennzeichnung 3.  
 Shore-Härtemesser 39.  
 Sinterkorund 4.  
 Sipa, Eigenschaftstabellen 292—299.  
 Soda 278.  
 Sonnenlicht, Einfluß von — 309.  
 Spaltbarkeit von Glimmer 2.  
 Spaltglimmer, Kennzeichnung 3.  
 Spaltbarkeit 194.  
 Spangebende Formung 36.  
 Spanlose Formung 38.  
 Spannung, mechanische 177.  
 — — durch Quellung 263.  
 — elektrische 149.  
 Spannungsabhängigkeit des Widerstan-  
 des 88.  
 Spannungs-Dehnungs-Schaubild 177.  
 Spannungsprüfungen 150.  
 — nach ausländischen Vorschriften 155.  
 Spannungssteigerung 150.  
 Spannungsverteilung in Werkstücken  
 257.  
 Spannungswandler 151.  
 Speckstein 4.  
 Spezifische elektrische Stoffeigenschaften-  
 werte 60.  
 — Verlustleistung 96.  
 — Wärme 233, 299, 307.  
 — Wechselstromwirkleitfähigkeit 96.  
 Spezifischer Isolationswiderstand von  
*Luvican*, Azetylzellulose und  
 Kabelisoliermasse 85.  
 — Oberflächenwiderstand 71, 90.  
 — Widerstand 77, 291, 295.  
 Spezifisches Gewicht 174.  
 — Volumen 305.  
 Spritzdruck 301.  
 Spritzgußverfahren 11.  
 Spritzmassen, Klassifizierung 42.  
 Spritztemperatur 301.  
 Sprödigkeit 209, 210.  
 Statistische Darstellung der Versuchs-  
 ergebnisse 167.  
 — Verteilung 153.  
 Stauchung 186.  
 Steatit 4.  
 — Eigenschaftstabellen 292—299, 312.  
 Stern dreieckstransformation 104.  
 sthène 182.  
 Stoffbezeichnung 13.  
 Streckgrenze 187.  
 Strombegrenzung 89.  
 Stromverzweigung 101.  
 Stufenspannung 156.  
 Styrol-Polymerisate, Eigenschaftstabellen  
 300—309, 256.  
 Substitutionsverfahren 117.  
 Sulfamid-Formaldehyd-Kondensations-  
 produkte, Identifizierung 26.  
 Summenhäufigkeit 169.  
 Tafelglas 90.  
 Tafelpreßspan 7.  
 Talkum 4.  
 Technische Vereinigung der Hersteller  
 typisierter Preßmassen und Preß-  
 stoffe e. V. 288.  
 — Wechselstrombrücken 125.  
 Teer, Verwendung für Isolierstoffe 6.  
 tg  $\delta$  93.  
 Tegofan, Identifizierung 26.  
 Teilkapazität 107, 115.

- Telefon 113.  
*Tempa*, Eigenschaftstafeln 292—299.  
 312.  
 Temperatur, elektrische Eigenschaften  
 in Abhängigkeit von der — 162.  
 Temperaturleitfähigkeit 233.  
 Temperaturwechselbeständigkeit 250,  
 251.  
 Tera-Ohmmeter 89.  
 Thermische Eigenschaften 299, 307.  
 — Prüfungen 228.  
 Thermoplaste 38.  
 Thermostat 166.  
 Thermowattmeter 140.  
 Thioharnstoff-Formaldehyd-Konden-  
 sationsprodukte, Identifizierung 26.  
*Thiokol*, Identifizierung 26.  
 THOMSONScher Kondensator 66.  
 Titandioxyd 5.  
 Toluol, Prüfung auf Verhalten gegen —  
 278.  
 Ton 5.  
*Tornesit*, Identifizierung 26.  
 Transformatorenöl 6.  
 — Prüfung auf Verhalten gegen — 280.  
 Trägheitsmoment 198.  
*Transparit*, Identifizierung 24.  
 Triazetatfolie 8.  
 Trikresylphosphat, Identifizierung 26.  
 Trockendauer, Bestimmung an Isolier-  
 lacken 36.  
 Trockengleichrichter 136.  
*Trolit*, Identifizierung 25.  
 — *F* 8.  
 — *W* 8.  
*Trolitul* 11.  
 — Identifizierung 24.  
 Tropenfestigkeit 281.  
*Trotex*, Identifizierung 26.  
*Tylose*, Identifizierung 24.  
 Typ 284.  
 — A, Kennzeichnung 8.  
 — A, Eigenschaftstafeln 300—309.  
 — K, Eigenschaftstafeln 300—309.  
 — K, Kochprüfung 276.  
 — M, Eigenschaftstafeln 300—309.  
 — N 8.  
 — S, Eigenschaftstafeln 300—309.  
 — S, Wasseraufnahme 266.  
 — T 1, Eigenschaftstafeln 300—309.  
 — T 2, Eigenschaftstafeln 300—309.  
 — T 3, Eigenschaftstafeln 300—309.  
 — X 5.  
 — X, Eigenschaftstafeln 292—299.  
 Typ Y 5.  
 — Y, Eigenschaftstafeln 292—299.  
 — Z 1, Eigenschaftstafeln 300—309.  
 — Z 2, Eigenschaftstafeln 300—309.  
 — Z 3, Eigenschaftstafeln 300—309.  
 — 0, Eigenschaftstafeln 300—309.  
 — 2, Eigenschaftstafeln 300—309.  
 — 3, Eigenschaftstafeln 300—309.  
 — 4, Eigenschaftstafeln 300—309.  
 — 7, Kennzeichnung 6.  
 — 8, Kennzeichnung 6.  
 — 11, Eigenschaftstafeln 300—309.  
 — 12, Eigenschaftstafeln 300—309.  
 — 12, Wasseraufnahme 266.  
 Typbezeichnung 13.  
 Typisierung 201, 284.  
 Übersetzungsverhältnis 151.  
 Überwachung 201, 284.  
 Überwachungsvertrag 288.  
 Überwachungszeichen 201, 288.  
*Ultracalan*, Eigenschaftstafeln 292—299.  
 Ultrathermostat 232.  
 Union des Syndicats de l'Électricité 17.  
 — s. auch französische Vorschriften.  
 Universal-Prüfgerät 199.  
 Universal-Prüfmaschinen 179, 188.  
 Universalwerkzeug nach NITSCHE 52.  
 Unvollständige Abschirmung 118.  
 U.S.E. 21.  
 Vektorielle Darstellung elektrischer  
 Größen 102.  
 Verarbeitung, Prüfverfahren 35.  
 Verarbeitungsbedingungen 293.  
 Verband Deutscher Elektrotechniker 17.  
 Verdichtungsfaktor 50.  
 Verdrehfestigkeit 208.  
 Verdrehspannung 209.  
 Verdrehversuch 208.  
 Verformbarkeit 301.  
 Verformung beim Druckversuch 187.  
 Vergießbare Massen 153.  
 Verkupfern 62.  
 Verluste von Schwingungskreisen 99.  
 Verlustfaktor 93.  
 — aus Temperaturmessungen (kalori-  
 metrisches Meßverfahren) 140.  
 Verlustfaktormessungen 139.  
 Verlustleistung 93.  
 Verlustwinkel  $\delta$  93.  
 Verlustziffer 97.  
 Versilbern 62.

- Verstärker 114, 129.  
 — im Nullzweig 127.  
 Verstimmsungsverfahren 143.  
 Versuchsbedingungen, besondere — bei elektrischen Messungen 161.  
 Vibrationsgalvanometer nach SCHERING 113.  
 — nach RUMP 113.  
*Victron*, Identifizierung 24.  
*Vinnapas*, Identifizierung 25.  
*Vinifol* 11.  
*Vinnilith*, Identifizierung 25.  
*Vinoflex*, Identifizierung 27.  
 Vinyl-Azetat-Polymerisate, Eigenschaftstafeln 300—309.  
 Vinyl-Chlorid-Polymerisate, Eigenschaftstafeln 300—309.  
 Viskosimeter nach HÖPPLER 39.  
 Viskosität, Bestimmung an Isolierlacken 36.  
 Volumen 305.  
 Vorbehandlungen 57, 162.  
 — für die Messung des Oberflächenwiderstandes nach ausländischen Vorschriften 75.  
 Vorschaltwiderstände 151.  
*Vulkanfiber* 7.  
 — Eigenschaftstafeln 300—309.  
 Vulkanisate aus Naturkautschuk 177.  
 Vulkanisation, Kautschuk 7.  
  
 Wachs, Verwendung für Isolierstoffe 6.  
 Wärmebeanspruchung, dauernde und kurzzeitige 253.  
 — langfristige 251.  
 Wärmebeständigkeit 234.  
 Wärmedehnzahl 229, 299, 306.  
 Wärmedurchschlag 153.  
 Wärmefestigkeit nach MARTENS 235, 299, 307.  
 — nach VICAT 235, 242.  
 Wärmekapazität 233.  
 Wärmeleitfähigkeit 231.  
 Wärmeleitvermögen 231.  
 Wärmeleitzahl 231, 299.  
 Wärmeübergang 232.  
 Wärmeverluste 232.  
 WAGNERSCHER Hilfszweig 120.  
 Wahrscheinlichkeitspapier 169.  
 Warmpreßverfahren 11.  
 Wasser, Bestimmung des — in Asbest 19.  
 — Wirkung von — 265.  
  
 Wasseraufnahme 266, 297, 308.  
 Wasserdampf-Durchlässigkeit 272.  
 Wasserglas, Verwendung für Typ X 5.  
 Wasserlösliche Bestandteile, Bestimmung der — in Gummi 20.  
 Wasserstoffperoxyd, Prüfung auf Verhalten gegen — 278.  
 Wechselbeanspruchung, thermische 250.  
 Wechselnde Beanspruchung 224, 225.  
 Wechselstrombrücken 100, 114.  
 Wechselstrom-Scheinwiderstand 96.  
 Wechselstromwiderstand 96.  
 Weichgummi 7.  
 — Alterung, künstliche 282.  
 — Analyse 19.  
 — Dickenmessung 174, 184.  
 — Härteprüfung 193.  
 — Zugversuch 183.  
 Weichmacher 18.  
 — Bestimmung des — in Kabelmassen 30.  
 Weichheit 193.  
 Weichheitszahl 193.  
 Werkstoffprüfung 57, 202.  
 — Grundlage 286.  
 Wetterfestigkeit 272, 281.  
 Wetterfestigkeitsprüfung, künstliche 272.  
 Wichte 174.  
 Widerstände 104.  
 Widerstände der Zuleitungen 127.  
 Widerstand gegen schroffen Temperaturwechsel 250.  
 Widerstand im Innern 77.  
 Widerstandskapazität 77.  
 Widerstandsmessung durch Strom- und Spannungsmessung 78.  
 — durch Vergleich mit einem bekannten Widerstand 78.  
 — (ballistisch) 79.  
 — (elektrometrisch) 82.  
 — mit Röhrenelektrometer 84.  
 Widerstandsmoment 209.  
 Widerstandsoperator 102.  
*Wien*-Brücke 122, 135.  
*Williams*-Plastometer 38.  
 Wirkleistung 95.  
 Wirkstrom 95.  
  
 Xylenol-Formaldehyd-Kondensationsprodukte, Identifizierung 24.  
 Xylo-lunlösliche Bestandteile, Bestimmung in Gummi 20.



- Zapfenkörper nach ZEBROWSKI 210, 221.  
Zeigerdiagramm für einen Schwingungskreis 98.  
Zeiteinfluß 194, 191, 224, 240, 241.  
Zeitkonstante eines Widerstandes 104.  
Zellhorn, Identifizierung 8, 26.  
*Zellophan*, Identifizierung 24.  
*Zelluloid* 8, 90, 300.  
— Eigenschaftstafeln 300—309.  
— Identifizierung 26.  
Zellulose, Identifizierung 24.  
Zelluloseabkömmlinge 7.  
— Eigenschaftstafeln 300—309.  
Zellulose-Azetat 8.  
— Eigenschaftstafeln 300—309.  
— Identifizierung 25.  
— kalter Fluß 190.  
Zellulose-Hydroazetat 8.  
Zellulose-Nitrat 8.  
— Eigenschaftstafeln 300—309.  
Zellulose-Nitrat, Identifizierung 26.  
Zellulose-Triazetat 8.  
Zement, Verwendung für Typ X 5.  
Zementasbest 159.  
Zentralwert 169.  
Zeresin 90.  
Zugfestigkeit 176, 297, 305.  
Zugstab für Dauerbiegeversuch 227.  
— gepreßter 185.  
— für keramische Stoffe 180.  
Zugversuch 176.  
— Ausführung 180.  
— Prüfgeräte 179.  
Zyklohexanon-Formaldehydharze, Identifizierung 25.  
Zylinderkondensator 91.  
Zylinderschutzringkondensator 67.

**Handbuch der Werkstoffprüfung.** In vier Bänden. Herausgegeben unter besonderer Mitwirkung der Staatlichen Materialprüfungsanstalten Deutschlands, der zuständigen Forschungsanstalten der Hochschulen, der Kaiser-Wilhelm-Gesellschaft und der Industrie, sowie der Eidgenössischen Materialprüfungsanstalt Zürich von **E. Siebel**, Stuttgart.

**Erster Band: Allgemeine Grundlagen. Prüf- und Meßeinrichtungen.** Bearbeitet von E. Berthold, Berlin, A. Eichinger, Düsseldorf, W. Ermlich, Berlin, G. Fiek, Berlin, L. Föppl, München, R. Glocker, Stuttgart, E. Lehr, Augsburg, E. Siebel, Stuttgart. O. Vaupel, Berlin. Herausgegeben von Professor Dr.-Ing. **E. Siebel**, Vorstand der Materialprüfungsanstalt an der Techn. Hochschule Stuttgart. Erscheint im Juni 1940.

**Zweiter Band: Die Prüfung der metallischen Werkstoffe.** Bearbeitet von K. Bungardt, Essen, E. Damerow, Berlin, U. Dehlinger, Stuttgart, R. Fricke, Stuttgart, A. Fry, Berlin, P. de Haller, Zürich, W. Hengemühle, Essen, R. Hinzmann, Berlin, F. Körber, Düsseldorf, A. Krusch, Düsseldorf, W. Kuntze, Berlin, R. Mailänder, Essen, A. Pomp, Düsseldorf, J. Schramm, Stuttgart, Fr. Schwerd, Hannover, W. Seith, Münster i. W., E. Siebel, Stuttgart, W. Steurer, Stuttgart, A. Thum, Darmstadt, F. Wever, Düsseldorf. Herausgegeben von Professor Dr.-Ing. **E. Siebel**, Vorstand der Materialprüfungsanstalt an der Technischen Hochschule Stuttgart. Mit 880 Textabbildungen. XVI, 744 Seiten. 1939. RM 66.—, gebunden RM 69.—

**Dritter Band: Die Prüfung nichtmetallischer Baustoffe.** Herausgegeben von Professor **O. Graf**, Stuttgart. Erscheint im Frühjahr 1940.

**Vierter Band: Organische Werkstoffe.** In Vorbereitung.

---

**Deutsche Austausch-Werkstoffe.** Von Professor Dipl.-Ing. **H. Bürgel** VDI, VAM, Chemnitz. (Schriftenreihe Ingenieurfortbildung, zweites Heft.) Mit 84 Abbildungen und 23 Zahlentafeln. VIII, 154 Seiten. 1937. RM 6.60

---

**Plastische Massen.** Herstellung, Verarbeitung und Prüfung nichtmetallischer Werkstoffe für spanlose Formung. Von Dr.-Ing. **A. Sommerfeld**, Freiburg i. B. Mit 165 Abb. XI, 346 Seiten. 1934. Geb. RM 28.—

---

**Werkstoffe für Gleitlager.** Bearbeitet von H. Berchtenbreiter, W. Bungardt, E. vom Ende, Frhr. F. K. v. Göler, R. Kühnel, H. Mann, H. v. Selzam, R. Strohauer, A. Thum, R. Weber. Herausgegeben von Dr.-Ing. **R. Kühnel**, Oberreichsbahnrat in Berlin. Mit 324 Abbildungen. IX, 427 Seiten. 1939. RM 48.—, gebunden RM 49.80

---

**Kunststoff-Technik und Kunststoff-Anwendung.** Fortsetzung der Zeitschriften Kunstharze und andere plastische Massen, Kunststoff-Verarbeitung, Wiener Kunststoff-Rundschau. Organ der Fachgruppe Schnitz- und Formerstoffe, des Verbandes der Hersteller von Gebrauchsartikeln aus Kunstharzen und der Technischen Vereinigung der Hersteller typisierter Preßmassen und Preßstoffe e. V. Unter Mitwirkung von Professor Dipl.-Ing. S. Boksan-Belgrad, Professor Dr. H. v. Euler-Stockholm, Dr.-Ing. R. Houwink-Amsterdam, Professor Dr.-Ing. H. Molinari-Mailand, Professor Dr.-Ing. R. Nitsche Berlin, Reg.-Rat Dr. G. Pfestorf-Berlin, Professor A. Schob-Berlin, Dr. H. Schuhmann-Berlin, Privatdozent Dr. H. Stäger-Zürich, Professor Dr. H. Staudinger-Freiburg/Br., Dipl.-Ing. W. Zebrowski-Troisdorf, Professor Dr. K. Ziegler-Halle. Herausgegeben von Professor Dr.-Ing. **W. Röhrs** VDCh, VDI, Berlin. 10. Jahrgang. 1940. Die Zeitschrift erscheint monatlich einmal. Vierteljährlich RM 3.75, Einzelheft RM 1.50

---

**Elektrotechnische Isolierstoffe.** Entwicklung. Gestaltung. Verwendung. Vorträge von H. Burmeister, W. Eitel, W. Estorff, W. Fischer, K. Franz, G. Pfestorf, R. Vieweg, W. Weicker. Veranstaltet durch den Bezirk Berlin-Brandenburg des Verbandes Deutscher Elektrotechniker — vormals Elektrotechnischer Verein e. V. — in Gemeinschaft mit dem Außeninstitut der Technischen Hochschule Berlin. Herausgegeben von Professor Dr. **R. Vieweg** VDE, VDI, Darmstadt. Mit 235 Textabbildungen und 2 Tafeln. IX, 295 Seiten. 1937. RM 18.30, gebunden RM 19.80

Inhaltsübersicht: Physikalische Grundlagen unter besonderer Berücksichtigung der anorganischen Isolierstoffe. Von Professor Dr. W. Eitel, Direktor des Kaiser-Wilhelm-Instituts für Silikatforschung, Berlin-Dahlem. — Organische Isolierstoffe. Von Professor Dr. R. Vieweg VDE, VDI, Darmstadt. — Prüfung von Isolierstoffen und Meßergebnisse aus der Isolierstofftechnik. Von Dr. G. Pfestorf VDE, VDI, Reg.-Rat bei der Phys.-Tech. Reichsanstalt, Berlin. — Keramische Isolierstoffe. Von Direktor Dr.-Ing. W. Weicker VDE, Hermsdorf (Thür.). — Organische Isolierstoffe in der Hochspannungstechnik. Von Dr.-Ing. W. Estorff VDE, Oberingenieur bei den Siemens-Schuckert-Werken A.-G., Berlin. — Isolierstoffe in der Niederspannungstechnik. Von H. Burmeister, Oberingenieur bei der AEG Berlin. — Isolierstoffe in der Fernmeldetechnik. Von K. Franz, Oberingenieur bei der Siemens & Halske A.G., Berlin. — Isolierstoffe in der Elektrowärmetechnik. Von Dr.-Ing. habil. W. Fischer VDE, Berlin. — Sachverzeichnis. — Übersichtstafeln.

---

**Die Isolierstoffe der Elektrotechnik.** Vortragsreihe, veranstaltet von dem Elektrotechnischen Verein E. V. und der Technischen Hochschule Berlin. Herausgegeben im Auftrage des Elektrotechnischen Vereins E. V. von Professor Dr. **H. Schering**. Mit 197 Abbildungen im Text. IV, 392 Seiten. 1924. Gebunden RM 14.40

---

**Elektrophysik der Isolierstoffe.** Von Privatdozent Dr. **Andreas Gemant**, Berlin. Mit 76 Textabbildungen. VI, 222 Seiten. 1930. RM 18.—, gebunden RM 19.35

---

**Gummifreie Isolierstoffe.** Technisches und Wirtschaftliches. Unter Mitarbeit von Fachgenossen verfaßt von Dr.-Ing. **A. Sommerfeld**, Freiburg i. B. Herausgegeben vom Zentralverband der deutschen elektrotechnischen Industrie E. V., Berlin. Mit zahlreichen Abbildungen. 103 Seiten. 1927. RM 2.52

---

**Dielektrisches Material.** Beeinflussung durch das elektrische Feld. Eigenschaften. Prüfung. Herstellung. Von Dr.-Ing. **A. Bültemann**. Mit 17 Textabbildungen. VI, 160 Seiten. 1926. RM 9.45, gebunden RM 10.80

---

**Das flüssige Dielektrikum.** (Isolierende Flüssigkeiten.) Von Privatdozent Dr.-Ing. **A. Nikuradse**, Berlin. Mit 82 Textabbildungen. VII, 226 Seiten. 1934. RM 18.—, gebunden RM 19.50

---

**Die Eigenschaften elektrotechnischer Isoliermaterialien in graphischen Darstellungen.** Eine Sammlung von Versuchsergebnissen aus Technik und Wissenschaft. Von Dr. **U. Retzow**. Mit 330 Abb. VI, 250 Seiten. 1927. Geb. RM 21.60

---