

# Elektrotechnische Isolierstoffe

Entwicklung · Gestaltung · Verwendung

Herausgeg von

R. Vieweg



# 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

**R. Vieweg**

Darmstadt

Mit 235 Textabbildungen  
und 2 Tafeln



Springer-Verlag Berlin Heidelberg GmbH

1937

Additional material to this book can be downloaded from <http://extras.springer.com>

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

**Copyright 1937 by Springer-Verlag Berlin Heidelberg  
Ursprünglich erschienen bei Julius Springer in Berlin 1937  
Softcover reprint of the hardcover 1st edition 1937**

ISBN 978-3-662-27310-4    ISBN 978-3-662-28797-2 (eBook)  
DOI 10.1007/978-3-662-28797-2

## Vorwort.

Dieses Buch verdankt seine Entstehung einer Vortragsreihe, die der Bezirk Berlin-Brandenburg des Verbandes Deutscher Elektrotechniker — vormals Elektrotechnischer Verein e. V. — in Gemeinschaft mit dem Außeninstitut der Technischen Hochschule Berlin in den Monaten Januar bis März 1937 veranstaltete. Von acht Rednern wurde ein Überblick über den heutigen Stand der elektrotechnischen Isolierstoffe gegeben. Bereits 1921 hatte der Elektrotechnische Verein eine ähnliche Vortragsfolge durchgeführt, die ihren Niederschlag in dem bekannten Buche von H. SCHERING: „Die Isolierstoffe der Elektrotechnik“ gefunden hat. Bei dieser ersten Reihe waren es wichtige Fortschritte in der physikalischen Erkenntnis und in der praktischen Meßtechnik, die neben den stofflichen Errungenschaften das Neue kennzeichneten. Zu den diesjährigen Vorträgen gaben ebenfalls bedeutsame Wandlungen Anlaß. Der allgemeine Umbruch in der Werkstoffauffassung betrifft in hohem Maße die Elektrotechnik, und hier ganz besonders die Isolierstoffe. Auf allen Teilgebieten befindet sich die Entwicklung im Fluß. Die Erkenntnis der Zusammenhänge ist durch die modernen Anschauungen über den Molekülbau und die chemische Konstitution wesentlich vorangetrieben worden. Die Forderung werkstoffgerechter Gestaltung gibt heute auch den Gegenständen aus Isolierstoff das Gepräge. Grundlegend hat sich in vielen Fällen die Verwendung der Isolierstoffe geändert. In kaum geahnter Weise sind Werkstoffe, die noch vor kurzer auf die Elektrotechnik beschränkt schienen, in andere Gebiete eingedrungen. Der Pionierdienst, den die Elektrotechnik durch ihre Bewertungen und Prüfungen in gleicher Weise an den organischen wie an den anorganischen Stoffgruppen geleistet hat, kommt heute der gesamten Technik zugute. Das Aufgabengebiet der Austausch- und Heimstoffe wirkt sich befruchtend auf die Entwicklung aus, gilt es doch, nicht nur selbstverständlich den alten Rang zu wahren, sondern zugleich mit den neuen Möglichkeiten ungelöste Aufgaben erfolgreich anzugreifen.

So liegt der Vortragsreihe eine Fülle von Tagesfragen zugrunde, deren Bedeutung für den Elektrotechniker, aber auch für den Maschinenbauer, den Chemiker und den Physiker einleuchtend ist. Die Probleme



sind nach der wissenschaftlichen und der technischen Seite von Männern der Praxis und der Forschung erörtert worden. Was in mündlichem Vortrag den Fachgenossen lebendig dargestellt werden konnte, ist versucht, in dem Buche in ergänzter und abgestimmter Form wiederzugeben. Da der Druck vor allem schnell durchgeführt werden sollte, sind Überschneidungen, Wiederholungen und andere Mängel nicht ganz zu vermeiden gewesen. Wir hoffen trotzdem, daß der Band der Fachwelt einen willkommenen Überblick über den heutigen Stand eines wichtigen Gebietes der modernen Werkstoffkunde gibt.

D a r m s t a d t, im Juni 1937.

**R. VIEWEG.**

# Inhaltsverzeichnis.

## Physikalische Grundlagen unter besonderer Berücksichtigung der anorganischen Isolierstoffe.

Von Prof. Dr. W. EITEL, Direktor des Kaiser-Wilhelm-Instituts  
für Silikatforschung, Berlin-Dahlem.

	Seite
Einleitung: Anforderungen der Technik an die Isolierstoffe . . .	1
I. Die elektrophysikalischen Eigenschaften, besonders der anorganischen Isolierstoffe . . . . .	3
1. Ionenleitfähigkeit . . . . .	3
a) Leitfähigkeit in der Masse. S. 3. — b) Oberflächenleitfähigkeit. S. 7.	
2. Dielektrische Verluste. . . . .	10
a) Ladungsströme und Restladung. S. 10. — b) Dielektrizitätskonstante. S. 12. — Dielektrischer Verlust im Wechselfeld. S. 13.	
3. Durchschlagfestigkeit . . . . .	18
a) Wärmedurchschlag. S. 18. — b) Elektrischer Durchschlag. S. 21.	
II. Die Gitterstruktur der anorganischen Isolierstoffe . . . . .	25
1. Typen der Kristallgitter . . . . .	25
a) Ionengitter, Gitter mit heteropolarem Gefüge. S. 25. — b) Homöopolare (unpolare) Gitter. S. 29. — c) Realkristalle und Gitteranomalien. S. 32.	
2. Gefüge der Gläser . . . . .	34
a) Theorie der Glaskolloide. S. 34. — b) Netztheorie der Gläser. S. 37.	
3. Gitter der speziellen kristallisierten und glasierten Isolierstoffe . . . .	38
III. Aufbau und Zusammensetzung der technischen anorganischen Isolierstoffe . . . . .	46
1. Heterogener Aufbau der keramischen Isolierstoffe für niedrigere Temperaturen . . . . .	46
a) Die Porzellane. S. 46. — b) Speckstein-(Steatit-)Gruppe. S. 47. — c) Rutilgruppe. S. 49.	
2. Aufbau von Isolierstoffen für Elektrowärmezwecke . . . . .	51
a) Porzellangruppe. S. 52. — b) Tonsubstanz-Specksteinmassen. S. 53. — c) Sinterkorundmassen. S. 54.	
3. Das Glas als elektrischer Isolierstoff. . . . .	54
Schrifttum . . . . .	57

**Organische Isolierstoffe.**Von Prof. Dr. **R. VIEWEG** VDE, VDI, Darmstadt.

	Seite
Einleitung . . . . .	61
Die organischen Isolierstoffe in der Elektrotechnik . . . .	63
Naturstoffe. Gummi; Öle; Harze; vergießbare Massen; Faserstoffe; Holz .	64
Kunststoffe. Allgemeine Kennzeichen; Gliederung . . . . .	66
Kondensate. Phenoplaste, Aminoplaste. Anilinharz. Die Typisierung der Preßstoffe . . . . .	67
Polymerisate. Chemische und physikalische Entwicklung Polystyrol; polymere Akrylate; Polyvinyle; Luvican, Oppanol; Buna . . . . .	70
Die Erscheinungsformen der Polymerisate . . . . .	73
Zelluloseabkömmlinge. Azetyl-, Benzylzellulose; Kunstseide; Zellophan; Triazetat; Cellon . . . . .	75
Chlorierung; chlorierte Naphthaline; Chlorkautschuk; Diphenylchlorid . . .	77
Anpassungsmittel; Verarbeitungsarten der Kunststoffe . . . . .	77
Gewährleistungsgrenzen; Forschungsfragen; Begriffserklärungen. Ergänzung der Wertetafeln . . . . .	78
Aus dem Schrifttum . . . . .	81

**Prüfung von Isolierstoffen und Meßergebnisse aus der  
Isolierstofftechnik.**Von Dr. **G. PFESTORF** VDE, VDI, Regierungsrat  
bei der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt, Berlin.

Einleitung . . . . .	83
I. Prüfung von Isolierstoffen . . . . .	83
Bewertung. S. 83. — Sicherheit. S. 84. — Elektrische Untersuchung. S. 85. — Brückenverfahren. S. 85. — Messung großer Kapazitäten. S. 87. — Messung kleiner Kapazitäten. S. 88. — Schreibende Meßgeräte für Isolier- stoff-Untersuchungen. S. 88. — Brücken mit selbsttätigem Abgleich. S. 90. — Schreibende Leistungsmesser. S. 92. — Einige Sonderanforderungen. S. 94. — Messungen bei Hochfrequenz. S. 94. — Tropensicherheit. S. 94. — Kriechstromfestigkeit. S. 95. — Mechanische Prüfungen. S. 97.	
Thermische Eigenschaften . . . . .	98
Linearer thermischer Ausdehnungskoeffizient. S. 98. — Thermische Leitfähigkeit. S. 101. — Wärmefestigkeit. S. 101. — Dauerwärme- beständigkeit. S. 101.	
Prüfung von nichtkeramischen Isolierstoffen . . . . .	102
II. Ergebnisse aus der Isolierstofftechnik . . . . .	102
Erkennung von Kunststoffgruppen. S. 103. — Elektrische Eigenschaften und Molekülbau. S. 103. — Gleichstromleitfähigkeit. S. 104. — Dielek- trische Verluste. S. 105. — Elektrische Durchschlagsfestigkeit. S. 108.	
Chemische Gesichtspunkte bei den Kunststoffen . . . . .	112
Anwendung der Röntgentechnik zur Erforschung organischer Isolierstoff- moleküle . . . . .	113
Gefügeuntersuchungen durch Schlißbilder . . . . .	114
Mechanische Eigenschaften . . . . .	115
Spannungsoptische Prüfungsergebnisse. . . . .	117
Zahlenwerte . . . . .	120

**Keramische Isolierstoffe.**Von Direktor Dr.-Ing. **W. WEICKER** VDE, Hermsdorf (Thür.).

Einleitung:	Seite
Hauptgruppen keramischer Werkstoffe, Übersichts- und Eigenschaftstafel . . . . .	121
I. Hartporzellan:	
Herstellung; Drehen, Strangpressen, Gießen, Pressen; Maßfragen; Glasur; neuere Gesichtspunkte zu einigen Eigenschaften; Prüfkörper, Ermüdung, Wechselfestigkeit. . . . .	123
Freileitungsisolatoren. Entwicklung. Mechanische, elektrische Ansprüche. Schwierige Betriebsverhältnisse . . . . .	126
Stützer, Durchführungen, Wandler. Kondensatoren. Hinweis auf Installationstechnik . . . . .	133
Hochspannungsprüfung. Neuere Gesichtspunkte. Stoßspannungsfragen	136
II. Keramische Sondermassen . . . . .	138
Einteilung. Herstellung. Trockenpressen. Zwischenbearbeitung. Zusammenglasierung. Maßhaltigkeit. Zusammenbau mit Metallteilen. Leitende Beläge . . . . .	139
A. Sondermassen Steatit, Calit, Frequenta. Richtunggebende Eigenschaften. Verlustfaktor. Maßhaltigkeit. Mechanische Festigkeit. Unveränderlichkeit der Eigenschaften. Bedeutung für die Hochfrequenztechnik. Anwendung als allgemeiner Baustoff, in Kondensatoren, bei Meßgeräten . . . . .	142
B. Rutilhaltige Sondermassen. Hohe Dielektrizitätskonstante, negativer Temperaturkoeffizient der DK. Kleinste Verlustfaktoren . . . . .	148
C. Sondermassen kleiner Wärmedehnung. Anwendungen in der Hochspannungs- und Wärmetechnik . . . . .	150
III. Verschmelzung keramischer Massen mit Glas und Metall:	
Hochvakuumdichte und temperaturwechselbeständige Verbindung mit Glas. Ein- und Anschmelzung von Metall . . . . .	151
Schrifttum . . . . .	153

**Organische Isolierstoffe in der Hochspannungstechnik.**Von Dr.-Ing. **W. ESTORFF** VDE,

Oberingenieur bei den Siemens-Schuckert-Werken A.-G., Berlin.

I. Einleitung. . . . .	155
Gliederung in Trägerstoffe und Tränk- und Bindemittel; Anforderungen an die mechanischen und elektrischen Eigenschaften; Beschränkung auf Hartpapier und Hartgewebe . . . . .	155
II. Die Ausgangsstoffe . . . . .	156
1. Papier und Gewebe als Träger; Papier- und Faserstoffarten . . . . .	156
2. Natur- und Kunstharze als Tränk- und Bindemittel; Schellack; Formaldehyd-Kondensationsstoffe mit Phenol und Kresol . . . . .	160
3. Aufbringen des Harzes auf den Träger . . . . .	163

	Seite
III. Die Verarbeitung und Anwendung . . . . .	165
1. Das Wickeln und Härten . . . . .	165
Isolierrohre im Transformatoren- und Schalterbau; Durchführungs- isolatoren, Aufbau und Prüfverfahren . . . . .	169
2. Das Pressen von Platten . . . . .	175
3. Das Pressen von Leisten . . . . .	177
4. Das Pressen und Härten von Formstücken . . . . .	177
Verformungsfragen. Sonderanforderungen für Expansionschalter. Kammern aus Hartgewebe. Prüfung der Isolierkörper.	
IV. Der Oberflächenschutz . . . . .	181
Keramische Überwürfe . . . . .	181
Lacke . . . . .	182
V. Tropenfeste Isolierstoffe . . . . .	183
Schrifttum . . . . .	81

### Isolierstoffe in der Niederspannungstechnik.

Von **H. BURMEISTER**, Oberingenieur

bei der Allgemeinen Elektrizitätsgesellschaft Berlin.

I. Grundstoffe der Isolierstofftechnik, bes. für Niederspannung. Die Rohstoffe. Naturstoffe — Wirtschaftliche Gesichtspunkte — Keramische Stoffe'—Kunststoffe.— Nähere Angaben für das Beispiel des Anilinharzes. — Zelluloseabkömmlinge . . . . .	186
II. Isolierstoffauswahl beim Bau von Geräten . . . . .	196
bei mechanisch stark beanspruchten Geräten . . . . .	197
bei wärmebelasteten und feuersicheren Geräten . . . . .	199
bei Feuchtraumgeräten . . . . .	205
bei kriechstromsicheren Geräten . . . . .	207
bei Geräten in chemischen Betrieben . . . . .	210
III. Isolierstoffe für Drahtisolation . . . . .	211
Isolationsauftrag bei Seide, Baumwolle, Lack, Apyrol . . . . .	211
IV. Isolierstoffe für Maschinen und Apparate . . . . .	216
Bedeutung der zulässigen Erwärmung; Einzelfragen aus dem Ma- schinenbau . . . . .	217

### Isolierstoffe in der Fernmeldetechnik.

Von **K. FRANZ**, Oberingenieur bei der Siemens & Halske A. G., Berlin.

Einleitung: Aufgabenstellung, Begrenzung auf den Fernmeldegeräteeau. . . . .	220
Sonderanforderungen an Isolierstoffe durch elektrische Be- dingungen, durch Fragen der Massenerzeugung, durch die Güte- und Maßhaltigkeitsansprüche der Feinwerkstechnik . . . . .	221
Die für die Fernmeldetechnik wichtigen Isolierstoffgruppen, mit ausführlichen Gestaltungsbeispielen . . . . .	225
A. Natürliche Isolierstoffe; Schiefer, Marmor, Asbest, Glimmer . . . . .	225
B. Keramische Isolierstoffe; die Sondermassen . . . . .	226

	Seite
C. Gummihaltige Isolierstoffe; Weich- und Hartgummi . . . . .	230
D. Geschichtete Isolierstoffe, Kunstharz-Hartpapier, Kunstharz-Hartgewebe . . . . .	231
E. Kunstharzpreß- und -spritzstoffe; Typen S, K, O; Azetylzellulose; Trolitul, Luvikan . . . . .	236
F. Papiere und Gewebe; Papier im Kondensatorbau; Leinen, Seide, Baumwolle; Isolierschläuche . . . . .	244
G. Isolation von Wickeldrähten; Lackdraht . . . . .	248

### Isolierstoffe in der Elektrowärmetechnik.

Von Dr.-Ing. habil. **W. FISCHER** VDE, Berlin.

1. Die Isolierung in der Elektrowärmetechnik . . . . .	251
2. Die physikalischen Eigenschaften der Isolierstoffe für Wärmebeanspruchung . . . . .	254
2 1. Die Temperaturbeständigkeit . . . . .	254
2 2. Die elektrischen Eigenschaften . . . . .	255
2 21. Der spezifische Widerstand . . . . .	255
2 22. Die Durchschlagfestigkeit . . . . .	256
2 3. Die Wärmeleitfähigkeit . . . . .	260
2 4. Die Temperaturwechselbeständigkeit . . . . .	262
3. Die verschiedenen Isolierstoffe und ihre Verwendung . . . . .	264
3 1. Die hochschmelzenden reinen Oxyde . . . . .	264
3 2. Geschmolzener Quarz . . . . .	267
3 3. Festgebrannte keramische Massen . . . . .	269
3 31. Schamotten . . . . .	269
3 32. MgO-haltige Massen . . . . .	270
3 4. Einbettmassen . . . . .	273
3 5. Rohrheizkörper . . . . .	278
3 6. Glimmer und Asbest . . . . .	282
4. Der Ableitstrom . . . . .	284
Schrifttum . . . . .	286
Sachverzeichnis . . . . .	288

#### Übersichtstafeln (am Schluß des Buches):

1. Übersicht zur Typisierung der „nichtkeramischen, gummifreien Isolierpreßstoffe“.
2. Übersichts- und Eigenschaftstafel keramischer Werkstoffe für die Elektrotechnik.

# Physikalische Grundlagen unter besonderer Berücksichtigung der anorganischen Isolierstoffe.

Von W. EITEL, Berlin.

## Einleitung.

Die vielen heute vom Elektrotechniker gebrauchten Isolierstoffe für die verschiedensten Zwecke teilen wir rein chemisch ein in solche der anorganischen und der organischen Gruppe. Unter die erste fallen die festen kristallinen oder glasigen Stoffe, die sich von der Kieselsäure ableiten, also die Silikate. Neben ihnen spielen in der neueren Elektrotechnik auch andere anorganische Verbindungen eine besondere Rolle, so z. B. das mit der Kieselsäure nahe verwandte Titandioxyd und die sich von ihm ableitenden Titanate. Weiterhin ist die Borsäure bei ihrer sehr weitgehenden Analogie mit der Kieselsäure für viele Isolierstoffe, besonders bei den Borosilikatgläsern, ein unentbehrlicher Bestandteil.

Die genannten Stoffgruppen der anorganischen Chemie begegnen in ihren physikalischen Eigenschaften den Ansprüchen, welche der Elektrotechniker an einen brauchbaren Isolierstoff stellen muß. Er verlangt in erster Linie geringes Eigenleitvermögen eines solchen Werkstoffes, sowohl in seiner Substanz als auch auf seiner Oberfläche. Ferner soll der Isolierstoff im elektrischen Felde, besonders bei Hochfrequenz einen möglichst geringen Energieverlust verursachen. Die Isolierstoffe sollen sich endlich bei höheren Spannungen durchschlagsfest verhalten. Diese Eigenschaften allgemeiner Art müssen sich vielseitig an die besonderen Verwendungszwecke der Isolierstoffe anpassen lassen. Wir weisen z. B. auf die Isolierung gegen Nieder- und Hochspannung hin, ferner auf die im Bau von Sendern und Empfängern der neuzeitlichen Fernmeldetechnik, endlich auf die wieder ganz anders gearteten Ansprüche beim Gebrauch von Isolierwerkstoffen in der Elektrowärmeindustrie.

Es ist zunächst die Aufgabe einer elektrophysikalischen Betrachtung der anorganischen Isolierstoffe, den Grund anzugeben, weshalb die oben genannten Körpergruppen besonders für Isolierzwecke unter hohen

Beanspruchungen geeignet sind. Zuerst verstehen wir als eine in ihrer anorganischen Natur gegebene Eigenschaft, daß sie gegen thermische Beanspruchung zum Unterschied von den organischen Isolierstoffen besonders widerstandsfähig sich verhalten. Wir erkennen in den anorganischen Isolierstoffen fest gebundene Strukturbausteine, die durch starre Bindung der in ihnen vorhandenen Ionen und Elektronen der elektrischen Beanspruchung sehr hohen Widerstand entgegensetzen. In einem solchen festgebundenen Dielektrikum haben wir eine sehr geringfügige Möglichkeit der Bewegung von Leitungselektronen und -ionen vor Augen.

Die zuletzt genannten Eigenschaften stehen in fundamentalem Gegensatz zu der sehr hohen Beweglichkeit der Leitungselektronen, die wir z. B. den Metallen zuschreiben haben. Nach dem heutigen Bild der Strukturtheorie stellen wir uns dies so vor, daß die Metalle nur ein starres Baugerüst von Metallatomen besitzen, in dessen Zwischenräumen sich die freien Elektronen (freie negative Ladungen) bewegen können, ohne daß das Atomgerüst in Mitleidenschaft gezogen wird. Die Elektronen diffundieren frei zwischen den Metallatomen wegen ihrer außerordentlich geringen Größe und erfüllen den Raum wie ein frei bewegliches „Gas“ gemäß den üblichen Vorstellungen der kinetischen Theorie. Neuerdings neigt man mehr zu der Anschauung, daß die Elektronen im Metallgitter einen Austausch ihrer Lage in der Nähe der Metallatome vollziehen können, „einen Platzwechsel“, bei dem sie von jenen in diskreten Lagen gehalten werden. Der bekannte negative Temperaturkoeffizient der elektronischen (metallischen) Leitung erklärt sich dann sehr anschaulich durch die Behinderung der Elektronenwege bei Vermehrung der Wärmeschwingungen der Atome des betreffenden Metalls, und den damit gehemmten Platzwechsel.

Bei den Isolierstoffen der anorganischen Gruppe haben wir keine elektronische Leitfähigkeit anzunehmen<sup>1</sup>. Wir befinden uns bei ihnen vielmehr in der großen Klasse der eigentlichen Ionenverbindungen vom Typus der Salze der Sauerstoffsäuren, oder auch in der Klasse der unpolaren Verbindungen, wie diese ja auch bei den Kohlenstoffverbindungen der organischen Stoffe vorliegen. Der ideale Isolierstoff wäre zweifellos ein vollkommen unpolarer Stoff, wie etwa der Diamant. Praktisch wird man diesen Idealzustand freilich wohl niemals ganz erreichen können, da immer geringste Spuren von Elektrolyten anwesend sind. Die meisten praktisch bedeutsamen Isolierstoffe sind Ionenleiter, sei es in ihrer Substanz oder durch unvermeidliche Verunreinigungen. Das besondere Interesse des Elektrotechnikers hat sich infolgedessen

<sup>1</sup> Eine sehr bemerkenswerte Ausnahme machen unter den einfachen Oxyden diejenigen Verbindungen, welche durch geringfügige Abweichung von der strengen stöchiometrischen Zusammensetzung, also durch einen Überschuß an Metall oder an Metalloid gekennzeichnet sind. Nach neueren Unter-



dem Ionenleitvermögen zuzuwenden, wie es besonders typisch bei den Gläsern sich findet und bei ihnen auch ausgezeichnet erforscht ist.

## I. Die elektrophysikalischen Eigenschaften der anorganischen Isolierstoffe.

### 1. Die Ionenleitfähigkeit.

a) **Leitfähigkeit in der Masse.** Die Erscheinung des elektrischen Leitvermögens der meisten anorganischen Isolierstoffe ist die mit elektrolytischer Zersetzung verbundene Ionenleitfähigkeit. Schon M. FARADAY (1) hat 1834 klar erkannt, daß z. B. bei den Gläsern elektrolytische Erscheinungen auftreten, und diese wie ein Gemenge einfacher Salzschnmelzen aufzufassen seien. Später beschrieb H. BEEZ 1874 am Glase die Temperaturabhängigkeit des Leitvermögens. Erst durch die klassischen Arbeiten von E. WARBURG 1884 aber wurde die Frage entschieden, ob die Gleichstromelektrolyse des Glases, des Porzellans und anderer Silikate den Gesetzen der Überführung und insbesondere dem FARADAYSchen Gesetz entspricht. Von WARBURG (2) wurde auch zuerst ausgesprochen, daß die Träger des Leitvermögens in den genannten Stoffen die Ionen des Natriums sind. Er konnte das kathodisch abgeschiedene Natrium quantitativ nachweisen und die völlige Gültigkeit des FARADAYSchen Gesetzes bestätigen.

In ganz entsprechender Weise gelang es alsdann WARBURG und TEGETMEIER (3) 1888, an einer senkrecht zur Hauptachse geschnittenen Platte aus wasserklarem Bergkristall ebenfalls ein elektrolytisches Leitvermögen nachzuweisen. Auch in diesem Fall sind Natriumionen die

suchungen von E. FRIEDRICH und W. MEYER<sup>1</sup> zeigen ungesättigte Verbindungen der niedrigsten Wertigkeitsstufe (z. B. NiO, CoO, Cu<sub>2</sub>O) eine Steigerung der Leitfähigkeit durch Metalloidüberschuß, wie er beim „Eintempnen“ von Sauerstoff entsteht. Andererseits ist das Leitvermögen solcher gesättigter Oxyde erhöht, bei welchen durch geringe Reduktion ein Teil des Sauerstoffs entfernt ist (z. B. TiO<sub>2</sub>, WO<sub>3</sub>); es genügt bereits Erhitzen im Vakuum, um eine solche geringfügige Änderung der Zusammensetzung herbeizuführen. Besonders sei auch auf den funktionellen Zusammenhang des Widerstandes des Stoffes mit dem Temperaturkoeffizienten des Widerstandes hingewiesen. Mit zunehmender Reduktion tritt immer mehr Elektronenleitfähigkeit des betreffenden Stoffes in die Erscheinung, z. B. bei „anreduziertem“ TiO<sub>2</sub>.

Ähnliche Anschauungen über Fehlordnungszustände, Elektronen-Überschußleitung und Defektleitung s. bei W. SCHOTTKY und C. WAGNER<sup>2</sup>.

<sup>1</sup> MEYER, W.: Z. Physik Bd. 85 (1933) S. 278—293 (dort ältere Lit.). —: Z. techn. Physik Bd. 16 (1935) S. 355—361. —: Techn.-wiss. Abh. Osram-Konz. Bd. 4 (1936) S. 94—96.

<sup>2</sup> WAGNER, C.: Zahlreiche Einzelabhandlungen über die „Theorie der geordneten Mischphasen“, die elektrische Leitfähigkeit von Oxyden und die „Natur der Fehlorderungserscheinungen“ in Oxyden und Halogeniden in Z. physik. Chem. B, Bd. 22—32 (1933—1936).

Träger des Leitvermögens. Eigenartig erschien bei diesen Feststellungen, daß nur die Kationen, nicht aber die Anionen an der Überführung teilnehmen, letztere also gewissermaßen in einem starren Gerüst festgelegt erscheinen. Wir haben es also mit ausgeprägtem unipolarem Leitvermögen zu tun. Dabei entsteht die besondere Frage, wie denn überhaupt z. B. Natriumionen in einen chemisch so einheitlichen reinen Stoff wie Bergkristall einzutreten vermögen.

WARBURG und TEGETMEIER nahmen an, daß es sich um Einschlüsse von Natriumsilikat handeln müsse. An der Eigenart dieses Problems wird nur wenig durch die Annahme von BECKENKAMP (4) geändert, der an Stelle des Natriumsilikates Natriumchlorid als Einlagerung im Bergkristall annahm. Einschlüsse von Lösungen mit ausgeschiedenen NaCl-Würfeln waren mikroskopisch tatsächlich beobachtet worden. Wie dem auch sein mag, es bestand die Tatsache, daß nur in Richtung der Hauptachse ein elektrolytisches Leitvermögen beim Quarz besteht, nicht aber senkrecht zu ihr. Man müßte also an feinste Hohlkanäle denken, die sich parallel zur Hauptachse durch den Kristall erstrecken. Wie fein diese sind, ist durch direkte mikroskopische Beobachtung nicht auszumachen [CURIE (5) 1888]. Vielleicht sind sie überhaupt so fein, daß sie nur im Gitterbau des Kristalls erkannt werden können und dann naturgemäß nur bestimmte Ionen durchlassen, die an sich genügend klein sind.

Dafür spricht vor allem die von TEGETMEIER (6) im einzelnen untersuchte Tatsache, daß bei Überführung anderer Ionen, z. B. von Kalium- und Lithiumionen aus einer Anode des betreffenden Amalgames durch den Quarz nur das kleine Lithiumion hindurchschlüpfen kann, nicht aber das durch seine Größe behinderte Kalium. Diese höchst bemerkenswerte Beobachtung des Ionenaustausches und seine Beschränkung auf die kleinsten Ionen wie: Na<sup>+</sup>, Li<sup>+</sup>, Ag<sup>+</sup>, ist auch bei Gläsern weitgehend bestätigt worden, und zwar nach den Untersuchungen von A. HEYDWEILLER und F. KOPFERMANN (7) (1908/09). Nur für die genannten Ionen ist auch die strenge Gültigkeit des FARADAYSchen Gesetzes erwiesen.

Wird aus Bergkristall oder Glas das die Ionenleitfähigkeit bedingende Na<sup>+</sup>-Ion elektrolysiert, ohne für weitere Zufuhr aus einer Amalgamanode zu sorgen, so verarmt das Silikat sehr schnell auf der Anodenseite an den erforderlichen Trägern des Leitvermögens; die Elektrolyse geht infolge des stark ansteigenden Widerstandes zurück. An der Anode bildet sich eine Kieselsäureschicht, die schließlich den Strom praktisch vollständig unterbricht.

Von besonderer Bedeutung für die Theorie der elektrischen Isolatoren ist die Temperaturabhängigkeit der Ionenleitung, wie sie im Sinne des von RASCH und HINRICHSSEN (8) (1908) aufgestellten Gesetzes  $\ln \kappa = -b/T + c$  als eine Exponentialfunktion des reziproken Betrages

der absoluten Temperatur sich darstellt. Diese wichtige Gesetzmäßigkeit ist bei zahlreichen Ionenleitern des silikatischen Typus bestätigt worden (z. B. nach Mc. DOWELL und BEGEMAN (9) 1928 an Gläsern) (Abb. 1). Sie erklärt vor allem ausgezeichnet die Tatsache, daß mit zunehmender Temperatur die Gläser ebenso wie die kristallisierten Stoffe sich immer mehr dem Zustand der schmelzflüssigen Elektrolyte nähern. Dies ist um so bedeutungsvoller, als auch für die innere Reibung eine dem RASCH-HINRICHSSENSCHEN Gesetz durchaus analoge Beziehung zur absoluten Temperatur besteht. Sogar von praktischer Bedeutung ist diese Analogie geworden, da man bei Gläsern die innere Reibung  $\eta$  bei gegebener Temperatur geradezu durch eine Widerstandsmessung  $\rho$  bestimmen kann, also die an sich sehr umständliche Bestimmung des Koeffizienten der inneren Reibung umgehen kann. Es ist

$$\log \eta = a \cdot \log \rho - b$$

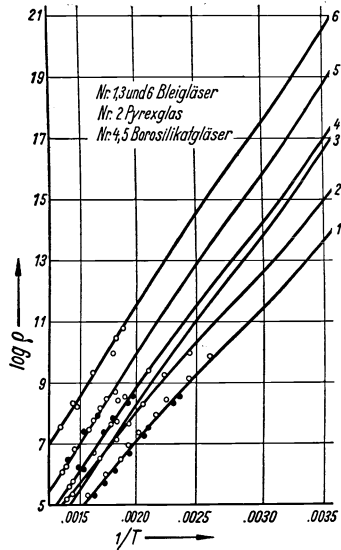


Abb. 1. Beziehung des spezifischen Widerstandes zur Temperatur bei verschiedenen Gläsern. (Nach Mc. DOWELL und H. L. BEGEMAN.)

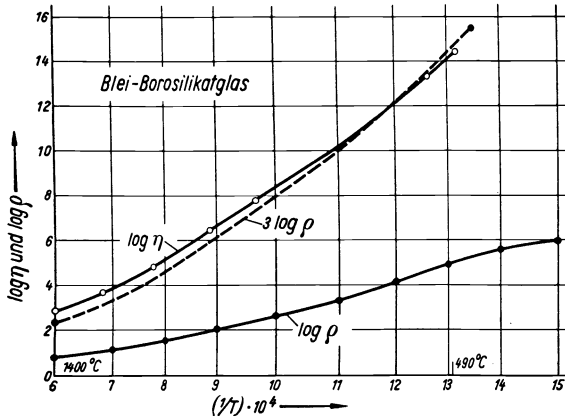


Abb. 2. Änderung von Leitvermögen und Viskosität mit der Temperatur. (Nach J. T. LITTLETON.)

oder  $\rho = b' \cdot \eta^{1/a}$  [nach LITTLETON (10) 1933, WOLAROWITSCH und TOLSTOJ (11) 1936] (Abb. 2).

Die Gültigkeit dieser Beziehungen reicht indessen nicht über ein ge-

wisses engeres Temperaturbereich hinaus; die Konstanten  $a$  und  $b$  des RASCH-HINRICHSSENSchen Gesetzes sind z. B. verschieden unter- und oberhalb gewisser kritischer Übergangstemperaturen im Glase, welche man daher als Transformationsgebiete (nicht -punkte, wie vielfach üblich) bezeichnet hat. Nach den Arbeiten von SCHÖNBORN (12) (1924) (Abb. 3) ist ein zweites Übergangsgebiet bei noch höheren Temperaturen

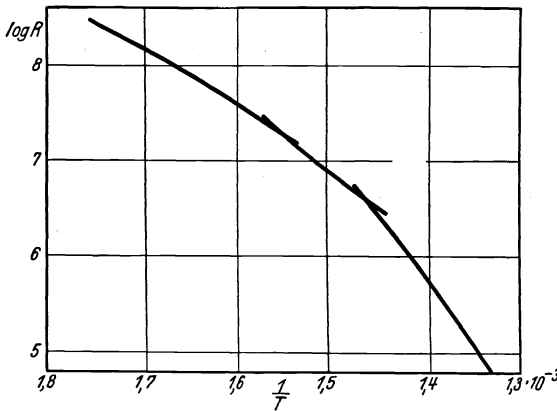
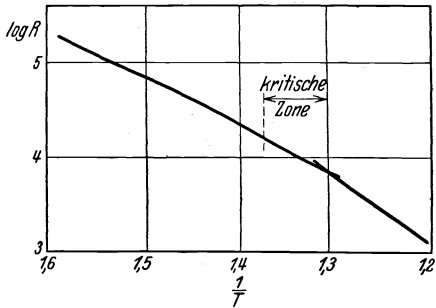


Abb. 3. Anomalien der Leitfähigkeit im Glase bei höheren Temperaturen. (Nach H. SCHÖNBORN.)

vorhanden, bei welchem nochmals die Werte der Konstanten sich ändern. Bei den höchsten Temperaturen oberhalb dieses sog. Aggregationsbereiches ist das Glas eine echte Schmelzlösung analog der Schmelze irgendeines Sauerstoffsalzes, es ist „schmelzflüssig“; zwischen Aggregations-

und Transformationsbereich ist das Glas plastisch, unterhalb des Transformationsbereiches ist es spröde. Innerhalb der drei genannten Gebiete kann die lineare Abhängigkeit des Logarithmus der Leitfähigkeit vom reziproken Wert der Temperatur aber mit genügender Genauigkeit bestätigt werden.

Was wir hier für die Gläser als die bestuntersuchten Silikate bezüglich des Elektrolytverhaltens

ausgeführt haben, gilt auch relativ von den zahlreichen anderen Silikaten, die als Isolierstoffe uns interessieren. Vom Standpunkt der Hochspannungstechnik aus erhebt sich aber die besonders wichtige Frage, ob bei hohen Feldstärken (etwa  $10^6$  V/cm) sich der Charakter der Leitfähigkeit ändern könne. POOLE (18) (1921) hatte z. B. geglaubt, unter solchen Bedingungen eine zusätzliche elektronische Leitfähigkeit z. B. im Glase annehmen zu müssen. Wir wissen heute durch eingehende Untersuchungen von F. QUITTNER (19) (1927), daß dies nicht der Fall ist; auch bei sehr hohen Feldstärken bleiben die silikatischen Isolierstoffe echte Ionenleiter, die allein dem FARADAYSchen Gesetz folgen. Dies ist übrigens nicht nur für die kathodische Überführung erwiesen,

wie dies schon seit den klassischen Untersuchungen von WARBURG feststand, sondern auch für die anodische. So konnte P. SELENYI (20) (1927) die anodische Ausscheidung von Sauerstoff dadurch nachweisen, daß er in Vakuumglühlampen durch die Glaswandung hindurch nach einem bekannten Verfahren von PIRANI und LAX (21) den Strom leitete. Macht man die glühende Wendel der Lampe zur Anode, so geht der Sauerstoff in das Innere der Lampe und erzeugt dort eine charakteristische blaue Glimmentladung. Auch quantitativ ist der anodische Sauerstoff auf diese Weise gemäß dem FARADAYSchen Gesetz zu bestimmen.

Theoretisch ist noch von besonderem Interesse, daß nach neueren Untersuchungen von HÄNLEIN und THOMAS (13) (1934) das Leitvermögen von Gläsern ebenso wie die Viskosität [vgl. die Arbeiten von LILLIE (14) 1933] bei den Transformationstemperaturen sich nicht diskontinuierlich ändert, wenn statisch, d. h. unter konstanter Temperatur, bei der Bestimmung verfahren wird. Die oben erwähnten Unstetigkeiten sind offenbar ganz durch dynamische Arbeitsmethode bedingt, bei der die Temperatur während der Messungsreihe sich ändert [vgl. z. B. SEDDON, TIPPET, TURNER (15) 1932]. Besonders merkwürdig ist auch, daß HÄNLEIN und THOMAS den SCHÖNBORNSchen Aggregationspunkt nicht mehr gefunden haben. Bis zu Temperaturen von 1300° verlief der Logarithmus des spezifischen Widerstandes linear mit der Temperatur, entsprechend der vordem von FULCHER (16) und TAMMANN (17) ursprünglich für die Viskosität gegebenen Interpolationsgleichung  $\log \varrho = -A + B/(T - T_0)$ .

**b) Oberflächenleitfähigkeit.** Die Isolierstoffe der silikatischen Gruppe werden bei ihrer praktischen Anwendung gewöhnlich unter ungünstigen äußeren Bedingungen, z. B. der Witterung eingesetzt. Wir müssen bei ihnen berücksichtigen, daß sie unter den Einflüssen der Atmosphären sich leicht mit einer Außenhaut überziehen, die in erster Linie Wasser, daneben aber auch die hydrolytisch gebildeten Zersetzungsprodukte der Silikatsubstanz enthält. In besonderem Maße neigen zur Bildung solcher Wasserhäute die gewöhnlichen Alkali-Kalk-Silikatgläser und alkalisilikathaltige keramische Werkstoffe. Eine solche Wasserhaut ist stets eine echte Salzlösung von ausgesprochenem elektrolytischen Charakter. Die Neigung gegebener Isolierstoffe zur Bildung dieser zweifellos unangenehmen Erscheinung ist eine rein chemische Angelegenheit ihrer Zusammensetzung. Als Haupt Gesichtspunkt muß gelten, zur Verbesserung der Isoliereigenschaften eines solchen Stoffes möglichst den Alkaligehalt herabzumindern, den Kieselsäuregehalt zu steigern. Reines Kieselglas bildet so gut wie überhaupt keine leitende Wasserhaut.

Elektrophysikalisch ist der Vorgang einer Oberflächen-Leitfähigkeit der Isolierstoffe oft eingehend untersucht worden, obwohl damit im

Gegensatz zum inneren Leitvermögen naturgemäß keine eindeutig kennzeichnende Materialkonstante des betreffenden Isolierstoffes gewonnen werden kann. Dagegen ist es praktisch von hohem Nutzen, das Ver-

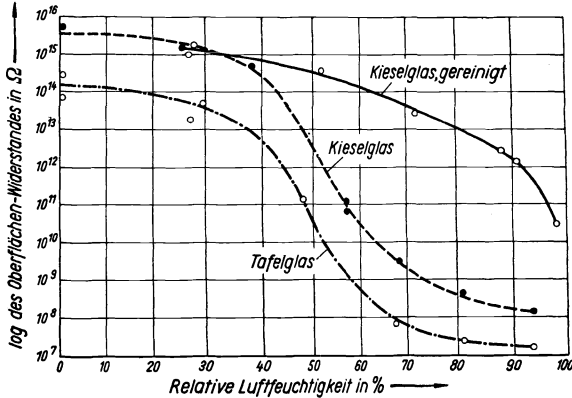


Abb. 4. Einfluß der Luftfeuchtigkeit auf die Oberflächenleitfähigkeit von Kieselglas und Tafelglas (bezogen auf die Flächeneinheit). (Nach H. L. CURTIS.)

halten unter verschiedensten atmosphärischen Bedingungen, wenigstens dem Verlauf nach, zu kennen. In dieser Beziehung weisen wir auf eine

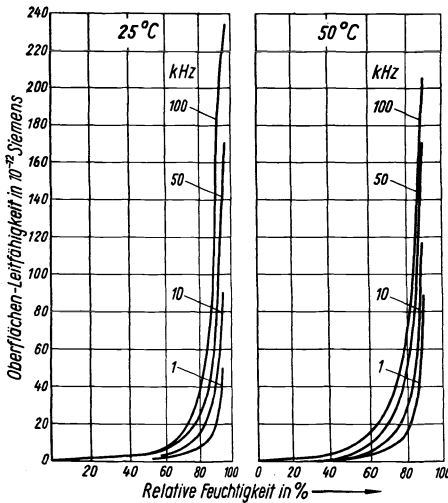


Abb. 5. Oberflächenleitvermögen von Pyrexglas in Abhängigkeit von Feuchtigkeit und Frequenz. (Nach W. A. YAGER UND S. O. MORGAN.)

Arbeit von MORGAN und YAGER (22) (1933) hin, nach welcher man sich die sog. Wasserhaut nicht etwa als eine zusammenhängende gleichförmige, etwa monomolekulare oder dickere Schicht von Wassermolekülen vorzustellen hat, sondern als eine solche mit sehr verschiedenartigen Alkalikonzentrationen an verschiedenen Stellen der Isolatoroberfläche. M. FULDA (23) (1927) bestimmte eine Wasserhautbildung in Abhängigkeit vom Chemismus des betreffenden Silikatglases auf die Weise, daß während einer bestimmten Zeit die Oberfläche direkt in feuchter

Atmosphäre exponiert und dann nach 15 Minuten durch eingelegte Drahtelektroden das Leitvermögen der Oberfläche gemessen wurde. Mit Recht wurde von LITTLETON (24) (1933) darauf hingewiesen,

daß ein solches Verfahren nicht eigentlich die Oberflächenleitfähigkeit des betreffenden Silikates zu charakterisieren vermag, sondern eher seine chemische Angreifbarkeit durch Feuchtigkeit. Daher kommt es auch,

daß die Ergebnisse von FULDA nicht mit anderen vergleichbar sind, z.B. mit Zahlenwerten nach CURTIS (25) (1914) (Abb. 4) oder von YAGER und MORGAN (22) (1931), welche sich auch auf die Frequenzabhängigkeit der Oberflächenleitfähigkeit erstreckten (Abb. 5).

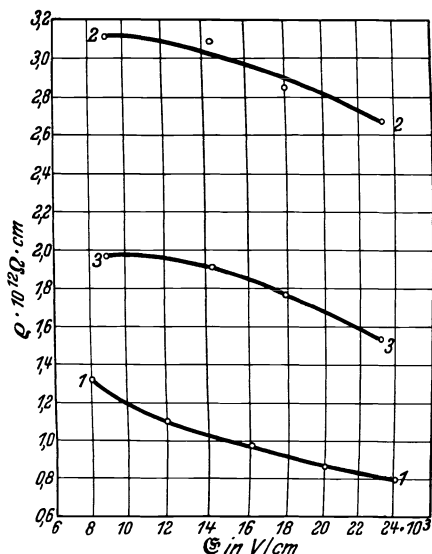


Abb. 6. Spezifischer Widerstand in Abhängigkeit vom Gasgehalt der Oberfläche. (Nach V. BUSH und L. H. CONNELL.)

Vor allem das Zusammenwirken von Feuchtigkeit mit der Temperatur bestimmt in weitestgehendem Maße die Oberflächenleitung der Gläser, für welche nach BUSH und CONNELL (26) in Abb. 6 typische Beispiele an Kieselglas und amerikanischen Pyrexgläsern gegeben sind. Auch die sehr bemerkenswerten Kurven von BRONSON (27) (1932) (Abb. 7) seien hier erwähnt, welche die sehr erheblichen Unterschiede der verschiedenen Gläser bei warmfeuchtem Klima zeigen. Entfernt man die Wasserhaut auf den Silikatgläsern durch Erhitzen im Vakuum, so erhöht sich der Oberflächenleitwiderstand außerordentlich rasch.

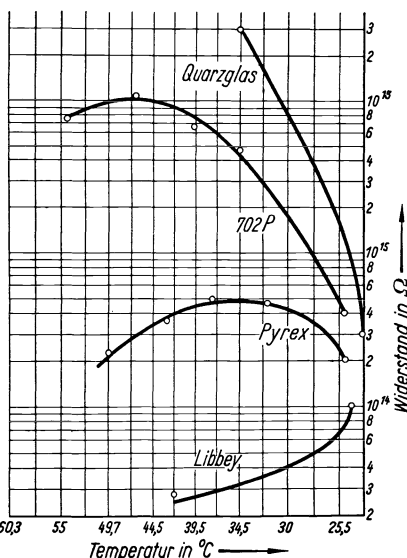
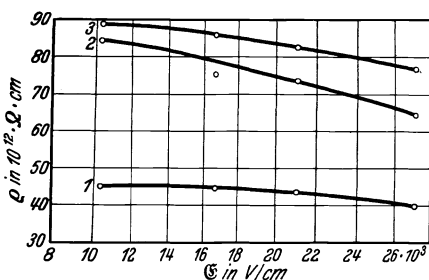


Abb. 7. Änderung des Widerstandes verschiedener Gläser mit der Temperatur an feuchtem Sommertag. (Nach H. L. BRONSON.)

BUSH und CONNELL zeigten dies besonders eindringlich an Kieselglas, welches im frischen, d. h. luftfeuchten Zustand einen Widerstand der Größenordnung  $4 \cdot 10^{11}$  Ohm zeigte; nach dem Behandeln bei  $350^\circ$  im Vakuum stieg dieser auf  $9 \cdot 10^{11}$  Ohm an, nahm aber nach neuer Exposition an der Luft im Laufe einiger Tage auf  $8 \cdot 10^{11}$  Ohm wieder ab. Ganz das Entsprechende zeigte sich bei dem Borosilikatglas Pyrex (Abb. 6). In der Wasserhaut sind bei diesen sehr alkaliarmen Gläsern offenbar bereits die in ihr sich lösenden flüchtigen Bestandteile von erheblichem Einfluß auf das Isoliervermögen der Oberfläche. Praktisch ist es also für die Zwecke der Verwendung von silikatischen Isolierstoffen in der Hochvakuumtechnik von größter Bedeutung, die Oberflächen so sauber und trocken wie möglich zu halten und durch Erhitzen im Vakuum auch weitgehend zu entgasen, wie es ja längst dort üblich ist.

## 2. Dielektrische Verluste.

a) **Ladungsströme und Restladungen.** Für das Verhalten eines silikatischen Isolierstoffes, z. B. Glas, im Felde höherer Gleichspannung ist kennzeichnend das Phänomen des Ladungsstromes. Der Vorgang, daß

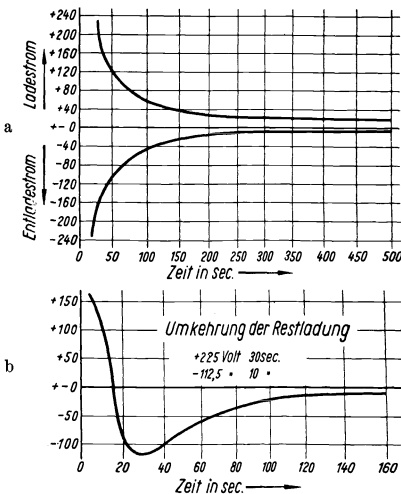


Abb. 8. Typische Ladekurven eines Borosilikatglases; die Zahlenangaben auf der Ordinate sind relative Skalenteile.  
(Nach E. M. GUYER.)

durch einen solchen Isolator im elektrischen Felde gemäß seiner Eigenleitfähigkeit ein stationärer Strom fließt, stellt sich nämlich erst nach Ablauf einer bestimmten Zeit ein, die nach Arbeiten von GUYER (28) (1933) je nach der Zusammensetzung zwischen wenigen Minuten und mehreren Stunden schwanken kann. Vor Erreichung dieses Endzustandes findet vielmehr ein Übergang des Stromes in den Isolator statt, es fließt ein „Ladestrom“, der zwischen dem Augenblick des Einschaltens und dem Endzustand auf den Wert des Leitungsstromes absinkt (Abb. 8). Der Vorgang der ersten Aufladung spielt sich nach den Feststellungen von ROGOWSKY (29) (1928) auf dem Kathodenstrahlen-Oszillogramm in wenigen Millionstel Sekunden ab. Darauf beginnt das Absinken des Potentials bei Ausbildung des eigentlichen Ladestroms, der über den Zeitraum vieler Minuten und Stunden sich erstrecken kann.

Entlädt man nunmehr das Gleichspannungsfeld, so beginnt in um-



gekehrter Richtung zum Ladestrom aus dem Isolator ein Entladungsstrom zu fließen, der wiederum über relativ lange Zeiträume hin ausklingt, und zwar gemäß Abb. 8a ungefähr spiegelbildlich zu diesem im Spannungszeit-Diagramm. Hieran erkennen wir die Deutung der schon 1746 von BENJAMIN FRANKLIN beschriebenen Erscheinung der „Restladungen“, z. B. im Glase von Leydener Flaschen. Der Entladungsstrom gibt in seinem Verlauf gewissermaßen die elektrische Vorbehandlung des Isolators im Gleichspannungsfeld spiegelbildlich wieder. Nach einem schon 1877 von HOPKINSON (30) gefundenen Prinzip wirken sich im Gang des Entladungsstromes die Ladungsvorgänge durch Superposition so aus, als ob ein jeder unabhängig von dem anderen besteht, sie in ihrer Gesamtheit also das Bild der Summe aller Einzelwirkungen geben. Ein schönes Beispiel für die Gültigkeit des Prinzips gibt nach GUYER Abb. 8b wieder, in der die Restladung und der Entladungsstrom an einem Borosilikatglas dargestellt ist, nachdem das Glas zunächst eine gewisse Zeit mit höherer Gleichspannung positiv dann kürzere Zeit in umgekehrtem Sinne geladen worden war. Die darauffolgende Entladung verläuft nach Superposition beider Vorladungen.

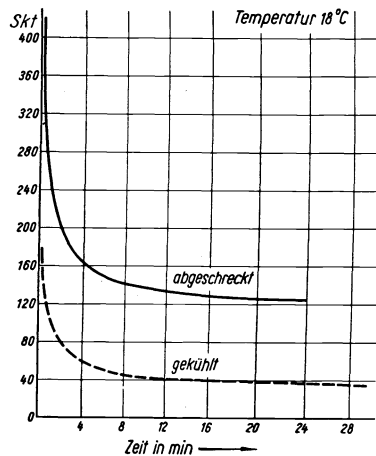


Abb. 9. Wirkung der Abschreckung und der Kühlung eines Opal-Borosilikatglases auf den Ladestrom.  
(Nach E. M. GUYER.)

In der Elektrophysik spielen die genannten Vorgänge als „Dielektrische Absorption“ und „Restladungseffekt“ schon seit langem eine große Rolle; sie interessieren uns aber an dieser Stelle ganz besonders, nicht allein wegen ihrer elektrotechnischen Bedeutung, sondern wegen ihrer offenbaren Beziehungen zum Aufbau des Dielektrikums, z. B. des Glases selbst. In dieser Beziehung ist der große Unterschied bemerkenswert, der zwischen einzelnen Zuständen des Dielektrikums je nach ihrer Wärmevergeschichte besteht. Ein rasch abgekühltes, also mit Spannungen behaftetes Glas hat nach GUYER (28) unter Umständen einen mehrfach größeren Ladestrom als das gleiche Glas im gut gekühlten Zustand (Abb. 9). Es bestehen also offenbar in beiden Fällen ganz erhebliche Verschiedenheiten der molekularen Struktur, welche die Ionenbeweglichkeit entscheidend verändern. Mit den thermischen Verspannungen, welche man im polarisierten Lichte bekanntlich durch anomale Doppelbrechung nachweisen kann, hängen diese inneren Zustandsverschiedenheiten nur indirekt zusammen; eine nachträgliche mecha-

nische Verspannung eines gut gekühlten Glases hat nach GUYER keinen Einfluß auf den Ladestromeffekt gezeigt. Das Glas verhält sich also im abgeschreckten Zustand offenbar so, als ob es in seinem physikalisch-chemischen Aufbau noch den Bedingungen bei hohen Temperaturen entspräche, es ist also auch in seiner molekularen Konstitution „unterkühlt“. Man spricht in diesem Sinne auch direkt von „Einfrieren“ der inneren Gleichgewichte bei dem Abschreckungsvorgang. Vom elektrophysikalischen Standpunkt aus ist diese Beobachtung sehr wichtig, lehrt sie doch, in wie hohem Maße die Eigenschaften eines Isolierstoffes von seinen konstitutiven Merkmalen abhängen müssen, also auch von der Vorbehandlung, die er technisch bei seiner Herstellung erfahren hat.

**b) Dielektrizitätskonstante.** Die wichtigste Materialkonstante für die allgemeine Kennzeichnung eines Dielektrikums im elektrischen Felde ist bekanntlich die Dielektrizitätskonstante, welche die Kapazität eines gegebenen Kondensators im Verhältnis zu einem Kondensator von den gleichen Abmessungen im Vakuum definiert (praktisch genügt es meist, auf Luft als Dielektrikum zu beziehen). Diese Konstante des Isoliermaterials ist von entscheidender Bedeutung beim Aufbau eines Kondensators, aber auch bei der Beurteilung der Isolierung von Leitersystemen. Beide Anwendungsfälle eines Dielektrikums sind einander in gewissem Sinne entgegengesetzt, denn für den Bau von Kondensatoren wird man wohl im allgemeinen eine hohe Dielektrizitätskonstante für den Isolierstoff wünschen müssen, um möglichst kompensierte Kondensatoren zu bauen; demgegenüber wird man die Dielektrizitätskonstante im allgemeinen für Isolierung beliebiger Leiter und spannungsführender Leitungssysteme möglichst niedrig zu bemessen trachten, besonders etwa bei Kabelisolierungen u. dgl.

Eine wichtige Rolle spielt die DK bei der Beurteilung der elektrischen Spannungsverteilung in dem Falle, daß der Isolator nicht völlig homogen ist, sondern z. B. unvermeidliche Inhomogenitäten und Gefügefehler aufweist, die durch die Herstellung bedingt sind. Dieser speziell bei den keramischen Isolierstoffen typische Fall ist gegeben, wenn ein solcher Werkstoff z. B. aus einem Medium von Kristallen höherer DK neben einem anderen von niedriger besteht, oder mit feinsten Lufthäuten oder -einschlüssen durchsetzt ist. Bezüglich der Spannungsverteilung in inhomogenen Medien gilt nämlich, daß der Hauptspannungsabfall an dem Medium mit der kleinsten DK eintritt. Ist daher die DK des kristallinen Anteils sehr hoch, so überwiegt also ganz bedeutend der Spannungsabfall im Luftfilm oder -einschluß. Wird der Kondensator mit hohem Potential belastet, so tritt alsdann in diesen Luft-einschlüssen leicht Glimmentladung auf, die zur Erhitzung des Isolators und zum Wärmedurchschlag führen kann. Man muß demnach für weitgehende

Homogenität des Aufbaues eines solchen Dielektrikums besorgt sein, den Scherben also so dicht wie möglich herstellen.

Praktisch wäre es von diesem Standpunkt verständlich, wenn man als völlig einheitlichen Isolierstoff ein Glas wählte. In der Tat hat die systematische Erforschung der dielektrischen Eigenschaften des Glases in Abhängigkeit von der Zusammensetzung, wie diese E. SCHOTT (31) (1923), F. KELLER (1932) und neuerdings K. EGAMI (32) (1934) untersuchten, bemerkenswerte Zusammenhänge erbracht. Leider ist aber die Auswahl der in Betracht kommenden Glastypen doch nur beschränkt.

Die Temperaturabhängigkeit der DK ist eingehend untersucht, besonders wieder an Gläsern. Im allgemeinen zeigt sich mit zunehmender Temperatur eine Zunahme der DK, die allerdings nicht sehr erheblich ist. Bei einem Natronkalksilikatglas und bei Niederfrequenz (STRUTT [33] 1935) kann man einen Glaskondensator noch bei 80° gebrauchen, bei Borosilikatglas sogar noch bei 120°. Bei der Frequenz  $10^4$  Hz ist der DK-Wert bei den gleichen Gläsern noch bei 140 bzw. 240° annähernd unverändert gegen die Raumtemperatur; bei noch höheren Temperaturen nimmt er aber rasch zu (Abb. 10). Die Frequenzabhängigkeit der DK ist im allgemeinen gering; mit zunehmender Frequenz nimmt sie allmählich ab, wie dies ADDENBROKE (34) (1920) an Glas im Frequenzbereich von  $10^2$  bis  $10^{14}$  Hz gezeigt hat.

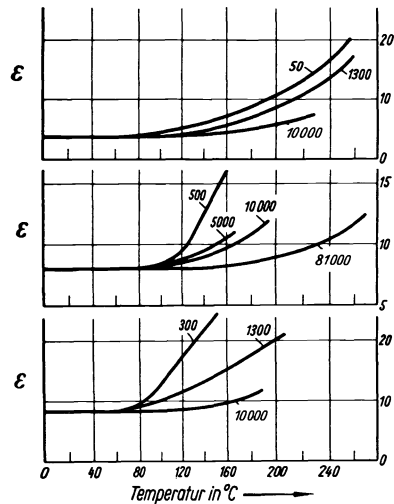


Abb. 10. Änderung der Dielektrizitätskonstante mit Temperatur und Frequenz (Na-Ca-Silikatglas).  
(Nach M. J. O. STRUTT.)

c) **Dielektrischer Verlust im Wechselfeld.** Von besonderer Bedeutung wird die Frage der Inhomogenität der Isolierstoffe aber vom Standpunkt der Theorie der dielektrischen Verluste im Wechselfeld. Wir müssen nämlich berücksichtigen, daß in einem gegebenen inhomogenen Dielektrikum nicht nur örtliche Unterschiede der DK-Werte, sondern auch der Leitfähigkeit bestehen, welche den linearen Verlauf des Feldes stören. Dies hat Verzögerungen des Ladungs- und Entladungsvorganges zur Folge, die zu Energieverlusten und den in anderem Zusammenhang schon oben besprochenen Restladungen führen. Unter Zugrundelegung dieser Erscheinungen hat K. W. WAGNER (35) eine umfassende Theorie der dielektrischen Verluste entwickelt, welche das Isoliermittel entsprechend älteren Betrachtungen von J. C. MAXWELL (36) als aus Schichten von

verschiedenen dielektrischen Eigenschaften aufgebaut und mit einer Eigenleitfähigkeit ausgestattet, auffaßt. Nachladungen und Verluste treten immer dann auf, wenn die Quotienten aus DK und Leitvermögen  $\lambda$  für die Schichten untereinander ungleich sind:  $\frac{\epsilon_1}{\lambda_1} \neq \frac{\epsilon_2}{\lambda_2} \neq \frac{\epsilon_3}{\lambda_3}$  usw. Es ist dabei völlig gleichgültig, ob das zusammengesetzte Dielektrikum tatsäch-

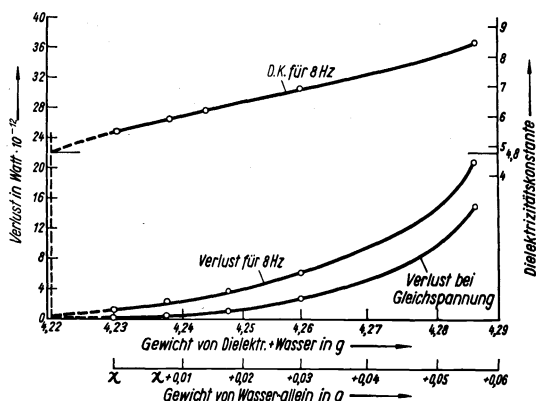


Abb. 11. Einfluß des Wassergehalts in Zelluloid auf den dielektrischen Verlust;  $x$  = Ausgangsgewicht. (Nach G. L. ADDENBROOKE.)

lich nur aus zwei diskreten Schichten oder aus einem statistisch inhomogen verteilten Zustand des Isolierstoffes hervorgeht. Bereits geringfügige Verunreinigungen, z. B. ein minimaler Wassergehalt, kann selbst in so homogenen Stoffen wie Quarz eine bedeutende Rolle bezüglich der Verluste bei Niederfrequenz spielen. Diese Beobachtungen sind völlig analog

zu den Verhältnissen, wie sie z. B. von ADDENBROOKE (37) (1924) an wasserhaltigen organischen Stoffen wie etwa Zelluloid gefunden worden sind (Abb. 11).

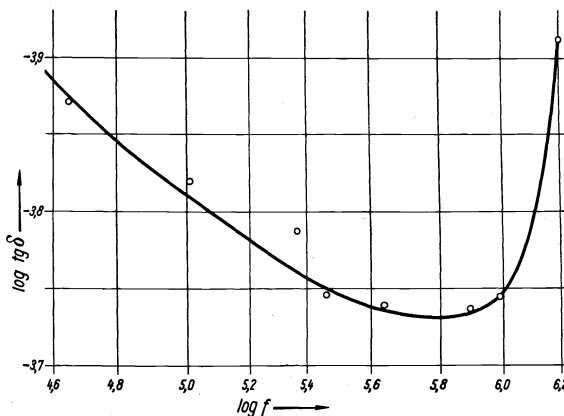


Abb. 12. Verlustwinkel in Abhängigkeit von der Frequenz (Glas). (Nach Mc. DOWELL und H. L. BEGEMAN.)

Die WAGNERSche Theorie hat sich für die Praxis als überaus fruchtbar erwiesen, sagt sie doch mit Zuverlässigkeit Effekte des dielektrischen Verlustes im Zusammenhang mit der Frequenz und der Temperatur voraus. Bei organischen Isolierstoffen, die z. B. in der Kabelindustrie angewendet werden, konnte das von WAGNER vorhergesagte Maximum des Verlustes bei einer bestimmten Frequenz wirklich gefunden werden. Demgegenüber sind bei anorganischen Isolierstoffen, Gläsern und vor allem keramischen Produkten entsprechende Beob-

achtungen nicht beobachtet worden. Demgegenüber sind bei anorganischen Isolierstoffen, Gläsern und vor allem keramischen Produkten entsprechende Beob-

achtungen kaum systematisch für ein größeres Dispersionsgebiet durchgeführt worden. In der sehr reichhaltigen technischen Literatur über diesen Gegenstand findet man scheinbar widersprechende Angaben über das Vorzeichen des Gradienten des Verlustes in Abhängigkeit von der

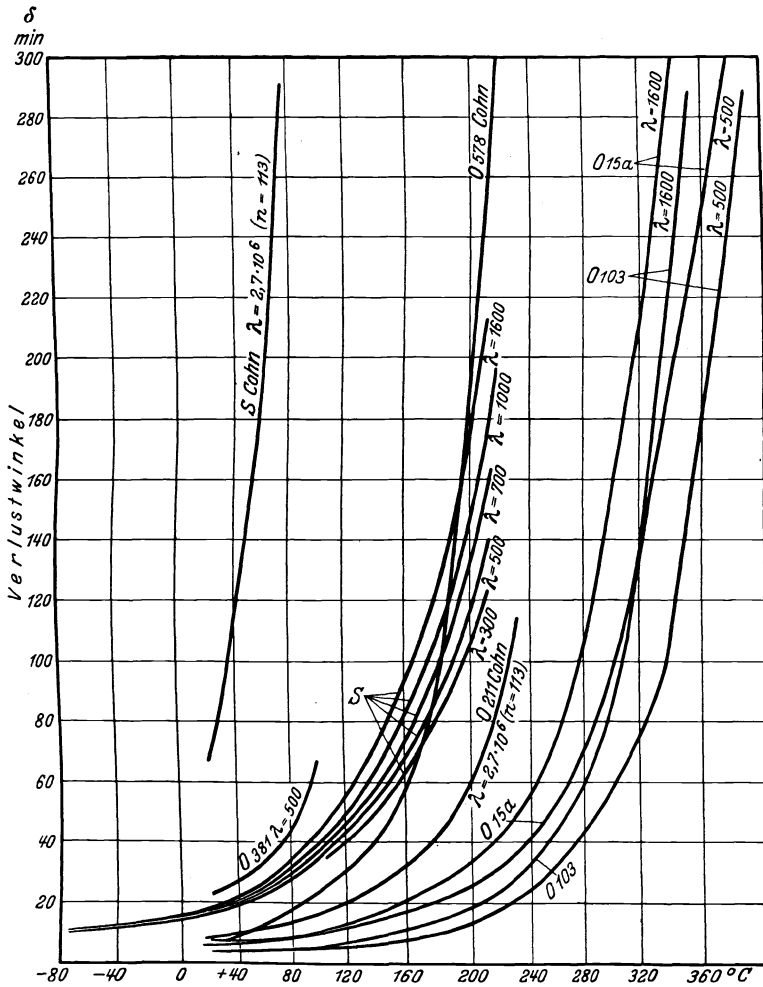


Abb. 13. Abhängigkeit des Verlustwinkels von der Temperatur<sup>1</sup>. (Nach E. SCHOTT.)

Frequenz. Einen besonders eigenartigen Fall mit einem Minimum des dielektrischen Verlustes in Abhängigkeit von der Frequenz bei einem Spezialglase zeigt Abb. 12 nach Mc. DOWELL und BEGEMAN (38). Man

<sup>1</sup> Die beiden Kurven S, O 578 und O 211 für die Frequenz  $n = 113$  entnommen der unveröffentlichten Dissertation von COHN, 1911, Jena.

könnte wohl daran denken, daß jeweils dann Werte beiderseits eines wirklichen Maximums angegeben würden. Dem steht aber entgegen, daß nur in einem einzigen Fall, nämlich für ein Glas nach HOPKINSON (39) wohl ein tatsächliches Maximum gefunden sein dürfte, allerdings bei der auffallend niedrigen Frequenz zwischen 7,3 Hz und 100 Hz.

Ein bemerkenswerter Zusammenhang mit der Temperatur besteht speziell für den Verlust der anorganischen Isolierstoffe; mit steigender Temperatur nimmt dieser zu und zwar nach MC. DOWELL und BEGEMAN entsprechend einer Exponentialfunktion von der Form:  $\text{tg } \vartheta = A \cdot e^{BT}$ . An Glas wurde dies von SCHOTT (31) bestätigt (Abb. 13). Diese Erscheinung ist bei Hochfrequenzfeldern wohl zu beachten, da innere Erwärmungen bis zu einem Temperaturgleichgewicht mit der Umgebung zustandekommen können, und ein höherer Endwert der Verluste in Rechnung gesetzt werden muß. Bei einem Hochspannungskondensator könnte es unter diesen Umständen sogar zu einer so unzulässigen Erwärmung kommen, daß sein Bestand in Frage gestellt wird.

Auf einem ganz anderen Wege als WAGNER kommt P. DEBYE (40) allgemein zu einer Theorie der dielektrischen Verluste, welche ohne Annahme von Inhomogenitäten des Mediums von den molekularen Eigenschaften selbst ausgeht. Dabei spielt die polare Beschaffenheit der Moleküle und ihre Orientierung im elektrischen Felde eine Hauptrolle. DEBYE definiert mit dem Begriff „Dipol“ ein molekulares Gebilde, bei welchem die elektrischen Schwerpunkte der positiven oder negativen Ladungen um eine kleine Strecke  $dx$  im Molekül auseinanderfallen, so daß ein permanentes elektrisches Moment  $\mu = dx \cdot \Sigma \text{ pos. Ladgn.}$  entsteht, das sog. „Dipolmoment“. Ein solcher Dipol wird sich im elektrischen Wechselfelde orientieren und synchrone Schwingungen ausführen. Eine merkliche Zeit  $\tau$  ist notwendig, um den Dipol den Einwirkungen des Feldes folgen zu lassen; sie ist eine Funktion der inneren Reibung  $\eta$  des Mediums, der Molekülgröße (bei Kugelform des Radius  $a$ ) und der absoluten Temperatur:  $\tau = \frac{4\pi\eta a^3}{kT}$  ( $k$  die BOLTZMANNsche Konstante).  $\tau$  ist also ein Maß für die Beweglichkeit der Dipolmoleküle im Felde. Stoffe ohne Dipolmoleküle, z. B.  $\text{CCl}_4$  oder Benzol, haben keine dielektrischen Verluste, welche z. B. durch Erwärmungseffekte nachgewiesen werden können, wohl aber ausgesprochen polare Moleküle wie z. B. o-Dichlorbenzol, Toluol, Nitrobenzol usw.

Die DEBYE'sche Theorie ist zweifellos diejenige Vorstellung, welche uns am tiefsten befriedigen könnte, da sie von ganz allgemeinen Gesichtspunkten der Molekularphysik ausgeht. Leider ist sie experimentell bisher nur bei Gasen und verdünnten Lösungen von Dipolstoffen angewandt worden, während die uns interessierenden festen Stoffe so gut wie noch nicht erschlossen sind. Die rechnerischen Schwierigkeiten sind

bei kristallisierten Systemen noch außerordentlich; allein beim Eis, dessen Moleküle  $\text{H}_2\text{O}$  ein ausgesprochenes Dipol von Dreiecksgestalt darstellen, konnten bereits durch ERRERA (41) einige Folgerungen der DEBYESchen Theorie geprüft werden, die sich vor allem auf die DK und das Dispersionsverhalten derselben erstrecken. Bei Ionenkristallen, wie wir sie meistens im praktischen Falle antreffen, ist die Begriffsbestimmung eines freien Dipols zunächst noch nicht durchführbar, auch noch nicht bei Gläsern, die hochkonzentrierte Lösungen von höchster Viskosität darstellen.

Theoretisch ist noch der Zusammenhang der Anomalie der DK im Gebiet der maximalen dielektrischen Verluste von besonderer Bedeutung für die Anwendung der DEBYESchen Theorie. Schon

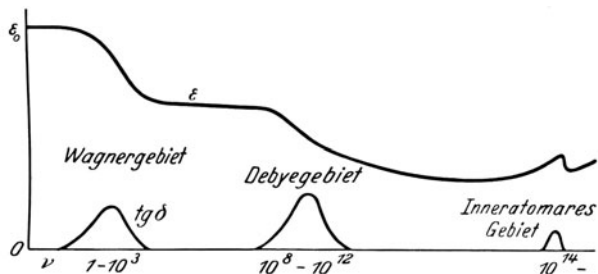


Abb. 14. Verlauf von  $\epsilon$  und  $\text{tg } \delta$  mit der Frequenz.  
(Nach A. GEMANT.)

DRUDE (42) hatte bei flüssigen Dielektrika gefunden, daß ein abnormes Verhalten der DK bei bestimmten Frequenzen Hand in Hand geht mit einer besonders starken Absorption elektrischer Schwingungen. Für diese Anomalien gibt die DEBYESche Theorie eine erschöpfende Erklärung durch die Dipolvorstellung, und zwar entsprechend den Relaxationszeiten  $\tau$  in der Größenordnung von  $10^{-12}$  sec in einem Frequenzbereich bei etwa  $10^{12}$  Hz.

In diesem Bereich befinden wir uns bei einem gegebenen Dielektrikum also im Gebiet der eigentlichen DEBYESchen Ansätze. Analoges aber gilt auch für höhere Frequenzen im Ultrarot, dem RUBENSSchen Reststrahlengebiet, welches völlig entsprechende Anomalien der optischen Dispersion aufweist. Wenn wir endlich für niedrige Frequenzen die ausgesprochenen dielektrischen Verluste hinzuziehen, welche auch mit Anomalien der DK verbunden sind, so befinden wir uns bei ihnen in einem Gebiet der Anwendbarkeit der WAGNERSchen Ansätze, und wir erhalten — nach GEMANT — ein zusammenfassendes übersichtliches Bild der Dispersionen von niedrigsten bis zu den höchsten Frequenzen (vgl. Abb. 14). — Die bei HOPKINSON (39) bereits erwähnte Anomalie, die sich im Gebiete eines maximalen Verlustes und einer Erhöhung der DK

um ein Mehrfaches äußert, fällt ausgesprochen in das WAGNERSche Gebiet der niederen Frequenzen.

### 3. Durchschlagsfestigkeit.

a) **Der Wärmedurchschlag.** Das Problem des elektrischen Durchschlages durch einen festen Isolierstoff hat schon seit langem eine eifrige theoretische Bearbeitung erfahren. Die offenbar nächstliegende Veranschaulichung des Durchschlages wäre etwa die, daß durch ein kristallisiertes Medium der elektrische Durchschlag auf Diskontinuitätsbahnen erfolgt, die durch eine Zerreißung des Gitterverbandes entstehen. Es müßte also, wie dies besonders ROGOWSKI (43) im einzelnen erläuterte, eine äußere Arbeitsleistung in den Kristall eingeführt werden, welche die wahre Zerreißfestigkeit des Verbandes überstiege. Die Rechnung ergibt im besonderen, daß die erforderlichen elektrischen Energien weit größer sein müßten, als sich tatsächlich als erforderlich erwiesen hat. Das Problem des Durchschlages wäre alsdann in gleicher Weise von Zufälligkeiten und störenden Einflüssen im Aufbau des Dielektrikums abhängig zu machen wie dies bei der Diskussion der mechanischen Zerreißfestigkeit der Fall ist (s. II. 1. c.).

Vom technischen Standpunkt aus interessiert aber weit mehr die Frage, wie ein Durchschlag entstehen kann, der unter länger dauernder

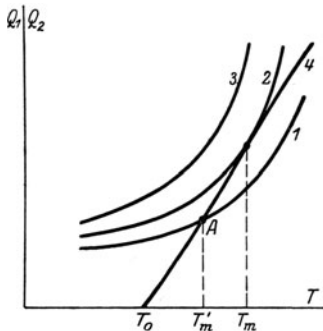


Abb. 15. Aufgenommene und abgeführte Wärmemenge im Isolator bei verschiedenen Spannungen.

(Nach N. SEMENOFF und A. WALTHER.)

Beanspruchung sich einstellt. Bei diesen Betrachtungen hat sich eine Theorie bewährt, die auf K. W. WAGNER (44) zurückgeht und die Erscheinung der inneren Erwärmung des Isolators durch den Stromdurchgang infolge einer wenn auch zunächst geringfügigen Ionenleitfähigkeit heranzieht. Eine solche Erwärmung ist bei den meisten technisch gangbaren Isolierstoffen um so eher anzunehmen, als diese auch recht geringes Wärmeleitvermögen besitzen. Wird die

durch einen an sich zunächst sehr geringen Stromdurchgang entwickelte JOULEsche Wärme aus den innersten Strombahnen im Medium nicht mehr genügend nach außen abgeführt, so kommt es zu einer Steigerung der Leitfähigkeit durch vermehrte Ionenleitung (s. I. 1. a), diese vermehrt wieder die Stromwärme, die ihrerseits wieder die Stromleitung verbessert usw., bis schließlich lawinenartig die Stromstärke anwächst und unter Schmelzerscheinungen der ausgesprochene Wärmedurchschlag erfolgt. Diese Vorstellung ist nach unseren allgemeinen Erörterungen über das Ionenleitvermögen der



Silikate, z. B. der Gläser, um so mehr den Tatsachen gerecht, je ausgesprochener die anfangs rein unipolare Leitfähigkeit unter Überführung von leichtbeweglichen Kationen (Na, Li usw.) bei gesteigerter Temperatur schließlich in bipolare übergehen könnte.

Die Bedingungen vor und beim Wärmedurchschlag können wir uns an Hand der Abb. 15 klarmachen, welche das Wärmegleichgewicht zwischen Stromwärme und Wärmeleitung durch das Dielektrikum darstellt [nach SEMENOFF und WALTHER (45)]. Die Gerade 4 versinnbildlicht die Wärmeableitung als Funktion des Temperaturgradienten in dem betreffenden Medium, die Kurven 1, 2, 3 stellen gemäß der WAGNERschen Theorie die JOULEsche Stromwärme dar, die z. B. in parallel zur Feldrichtung angeordneten Kanälen im Dielektrikum entwickelt wird. In den Punkten von Typus A, auf denen sich die Kurve für die Wärmeentwicklung mit der der Wärmeableitung schneidet, ist der stationäre Zustand eines Gleichgewichtes zwischen beiden Vorgängen dargestellt; die erzeugte und die abgeführte Wärmemenge ist die gleiche. Einen Grenzfall dieses Wärmegleichgewichtes sehen wir in dem Punkte gegeben, in welchem sich die besondere

Kurve 2 mit der Geraden 4 berührt. Die zugehörige Temperatur  $\tau_m$  ist das Temperaturmaximum für die Gleichgewichtsbedingung überhaupt. Ist die durch Ionenleitung entwickelte Wärmemenge so groß (entsprechend Kurve 3), daß die Wärmeleitung nicht mehr ausreicht, sie ins Gleichgewicht zu setzen, schneiden sich also die Kurven nicht mehr, so ist bei Stromdurchgang keine Grenze für die gegenseitige Wechselwirkung von Wärmeentwicklung und Stromleitung gegeben, es kommt bis zum Schmelzen des Dielektrikums und zum Wärmedurchschlag durch die Schmelze. Durch diese Vorstellung erklärt sich

eine weitere praktisch sehr bedeutsame Erscheinung: der Wärmedurchschlag erfolgt bei um so geringeren Feldstärken, je dicker die durchschlagende Schicht des Dielektrikums ist. Es erklärt sich dies leicht aus der Tatsache, daß in dickeren Körpern naturgemäß die Bedingungen der Wärmeableitung ungünstiger werden. In gleicher Weise ist der Wärmedurchschlag um so leichter und bei um so geringeren Feld-

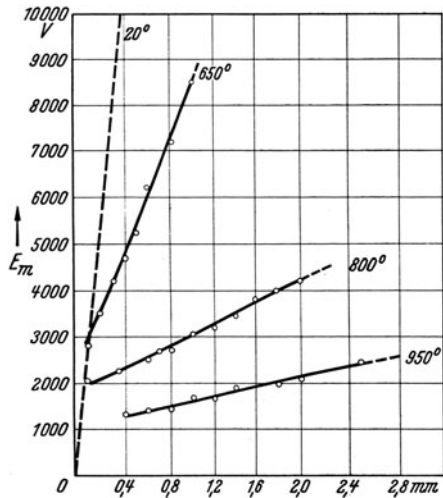


Abb. 16. Durchschlagsspannung  $E_m$  und Schichtdicke. Material: Dichte Steatitmasse. (Nach C. SCHUSTERIUS.)

stärken möglich, je höher die Ausgangstemperatur des Versuchskörpers ist. Beide praktisch bedeutsamen Erscheinungen spielen in der Anwendung von elektrischen Isolierstoffen bei höheren Temperaturen, also für Zwecke der Elektrowärmeindustrie eine wichtige Rolle, für welche nach SCHUSTERIUS (46) (1934) die Abb. 16 ein Beispiel ist. Besonders beim Betrieb elektrischer Widerstandsöfen ist die Erscheinung sehr zu beachten, zumal bei diesen auch die Dauer der Belastung eine ausschlaggebende Rolle spielt, da sie die Gestalt der Funktion der Wärmeableitung (entsprechend Kurve 4 in Abb. 15) beeinflusst. Die Bestimmung der aus Abb. 15 erkenntlichen Maximaltemperatur  $\tau_m$ , der „Durchschlagstempe-

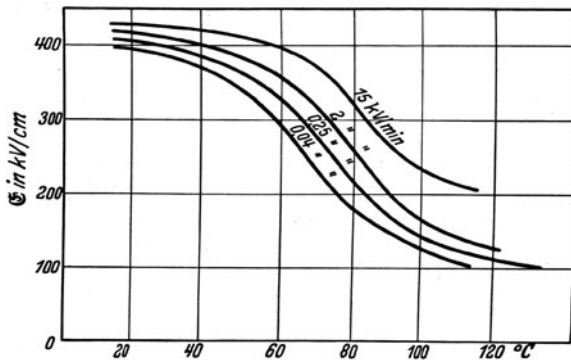


Abb. 17. Temperaturabhängigkeit der Durchschlagsspannung von Glas bei verschiedenen Spannungssteigerungen.  
(Nach E. MÜNDEL.)

ratur“ liefert geradezu einen Kennwert des betreffenden Isolierstoffes. Wird sie überschritten, so muß das auf die Dauer zur Zerstörung des Isolators führen. Auch ist zu beachten, daß im Vakuum, wo die Wärmeableitung besonders gering ist (es findet nur eine Wärmeabstrahlung statt, nicht eine Wärmekonvektion), also die Kurve 4 sehr flach zur Temperaturachse in Abb. 15 sich darstellt, die Bedingungen des Wärmedurchschlages offenbar sehr leicht eintreten, und zwar schon bei niedrigen Feldstärken und Temperaturen, wie dies MÜNDEL (47) gezeigt hat (Abb. 17). Demgegenüber sind von ROCHOW (48) (1925) höhere Feldstärken festgestellt worden, die der besseren Wärmeableitung bei seinen Versuchsbedingungen entsprechen.

Erhöhter Gasdruck bewirkt mittelbar eine Verbesserung der Feldverteilung beim Durchschlagsversuch, wie dies u. a. E. MARX (49) (1929) zeigte; v. HIPPEL machte sich diese Erscheinung zunutze bei der Untersuchung des Durchschlages von Einkristallen (s. u.). Arbeitet man z. B. unter einem Gasdruck von 75 atü, so erzielt man durch Zurückdrängung des sog. Randeffectes eine ausgezeichnete Reproduzierbarkeit der Durchschlagswerte, die bei normalem Druck nicht vorhanden zu sein pflegt.

Die bereits erwähnten Einflüsse der Belastungsdauer als Faktor beim Zustandekommen von Wärmedurchschlag ist direkt auch bei Steinsalz als Dielektrikum von INGE und WALTHER (50) nachgewiesen worden. Weit wichtiger sind die Bedingungen des Wärmedurchschlages aber bei Wechselspannung niedriger und hoher Frequenz. Ganz allgemein kann man praktisch annehmen, daß ein gegebener Isolierstoff bei Gleichspannung günstiger sich verhält als bei Niederfrequenz-Wechselstrom und da wieder günstiger als bei Hochfrequenz. Hier zeigt sich die ausgesprochene Mitwirkung dielektrischer Verluste, besonders in Medien von inhomogenem Aufbau. Die durch diese Verluste entstehenden inneren Erwärmungen können sogar den vorherrschenden Typus des Wärmedurchschlages bei Hochfrequenz in diesem Falle bestimmen, wirken sie doch wie eine Wärmeaufstauung, die den Verlauf der Kurve 4 in Abb. 15 verflacht, damit die Bedingungen der Labilität oberhalb  $\tau_m$  begünstigt. Bei dahingehenden praktischen Versuchen ist allerdings nicht zu vergessen, daß bei Hochfrequenz auch die Abdrängung des elektrischen Feldes zum Rande eine sehr erhebliche Rolle spielt, daß also streng genommen nur bei Elimination des Randeffectes, etwa unter erhöhtem Gasdruck, solche Messungen der Durchschlagsspannung vorgenommen werden sollten.

b) **Der elektrische Durchschlag.** Der Wärmedurchschlag ist nach den Untersuchungen von INGE und WALTHER (50) in seiner Temperatur-

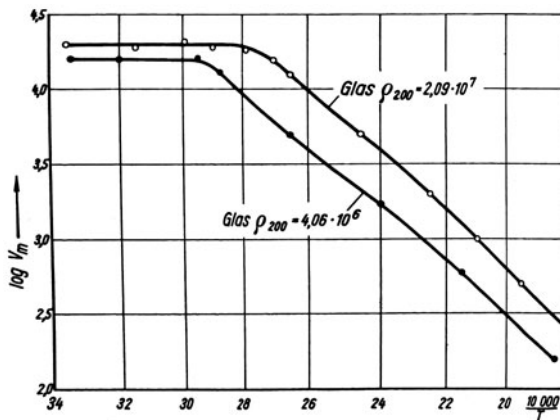


Abb. 18. Durchschlagsspannung und Temperatur.  
(Nach L. INGE und A. WALTHER.)

abhängigkeit dadurch gekennzeichnet, daß unterhalb einer bestimmten kritischen Temperatur, die als eine Konstante des betreffenden Stoffes gelten muß, die Durchschlagsspannung sich nicht mehr ändert, sondern mit fallender Temperatur konstant bleibt (Abb. 18, für Glas). An Stelle des typischen Wärmedurchschlages mit seiner Schmelzkanal-

bildung tritt bei tiefen Temperaturen nunmehr ein ausgesprochener elektrischer Durchschlag, der den Isolierstoff an der Stelle größter Spannungsbeanspruchung unter mechanischer Zertrümmerung durchschlägt. Wie insbesondere ROGOWSKI (51) durch Aufnahme mit dem Kathodenstrahloszillographen zu zeigen vermochte, ist der elektrische Durchschlag auch ein fast momentan, d. h. innerhalb einer Zeit von nur etwa  $10^{-8}$  sec sich abspielender Vorgang (Abb. 19). Ein Durchschlag dieser Art hat daher mehr Ähnlichkeit mit dem von vielen Autoren, neuerdings von A. VON HIPPEL (52) besonders eingehend untersuchten Durchschlag durch Gase.

Durch diese extrem kurzzeitigen Erscheinungen des elektrischen Durchschlags ist eine theoretische Anschauung als unhaltbar erkannt, welche JOFFE (53) auf Grund des Studiums des Ionenleitvermögens

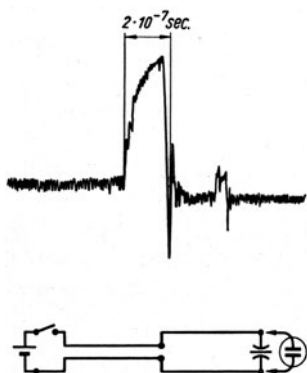


Abb. 19. Spannungsdurchschlag durch Glimmer.  
(Nach W. ROGOWSKI.)

kristallisierter Ionenkristalle entwickelt hatte, und die als Ionenstoßtheorie bezeichnet werden konnte. Nach ihr sollten bei hohen Feldstärken die Leitungionen genügend Energie auf sammeln können und im Zusammenstoß mit den Gitterionen diese heraussprengen, so daß diese durch die lawinenartig anschwellende Zahl der Stoßionen schließlich zum Durchbruch durch den Kristall führen sollten. Die Vorstellung begegnet der großen Schwierigkeit, wie genügende Beschleunigungen der Ionen zustande kämen, und außerdem steht sie eben dem Zeitbedarf nach im Widerspruch zu dem extrem kurzfristigen Durch-

schlagsvorgang, den ROGOWSKI überzeugend nachgewiesen hat.

Wir haben heute nach den Versuchen von STASIW (54) die direkte Anschauung, daß die eigentlichen Durchschlagserscheinungen mit Elektronendurchgängen durch den Kristall verknüpft sein müssen. Die Elektronen treten aus der Kathode in diesen mit einer Geschwindigkeit ein, die proportional zur Feldstärke ist. Bei den hohen Feldstärken im Durchschlagsspannungsbereich sind die Elektronen auf jeden Fall stark beschleunigt. Sie bewegen sich wie in einem Medium hoher innerer Reibung. Bei ihrer hohen Geschwindigkeit kommt es zur Stoßionisation, und diese Wirkung vervielfältigt sich lawinenartig bis zum endlichen Durchbruch. Ein grundlegender Unterschied gegenüber dem Elektronenstoß-Durchschlag in Gasen, den v. HIPPEL eingehend beschrieb, ist die im Kristall stattfindende Abhängigkeit des elektrischen Durchschlags von der Richtung. Die außerordentlich interessanten Feststellungen v. HIPPELS am Steinsalz und anderen regulär kristallisierten Alkali-

halogeniden erwiesen dieses Phänomen in seiner ganzen Reinheit, wenn man einen Einkristall dieser Stoffe unter besonderen strengen Anforderungen an homogenes Feld bis zum Durchschlag beansprucht. Hier zeigt sich die interessante Tatsache, daß z. B. beim Steinsalz der elektrische Durchschlag an Stelle einer unregelmäßig verlaufenden Bahn nunmehr

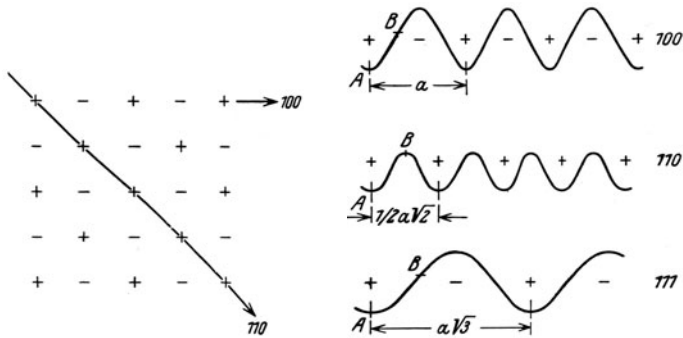


Abb. 20. Potentialschwellen im Steinsalzgitter. (Nach A. v. HIPPEL.)

eine kristallographisch genau bestimmte einhält. Bei dünnen Kristallplättchen erweist sich die Bahn als nach der Flächendiagonale des Würfels  $[110]$  orientiert, bei dickeren Platten nach  $[111]$ . Dieser Richtungsumschlag ist sehr bemerkenswert und auch theoretisch aus dem Gitter zu erklären, nämlich bedingt durch die verschiedenen Potentialschwellen, welche die Elektronen in den einzelnen Richtungen zu überwinden haben. Abb. 20 zeigt dies schematisch, und zwar deutlich die niedrigsten Potentialschwellen in Richtung  $[110]$ , die stärksten bei  $[100]$  (der Würfelkantenrichtung), während bei Richtung  $[111]$  die Schwellen am wenigsten steil verlaufen.

STEINMETZ (55), der die kristallographische Orientierung der Durchschlagkanäle in den Alkalihalogeniden näher untersuchte, stellte vor allen Dingen fest, wie diese den Symmetriebedingungen des Kristalls entsprechend sich nach der Zahl der gleichwertigen Richtungen gabelnd verteilen. Abb. 21 zeigt schematisch, wie die in Abb. 22 erkennbaren Kanäle von dem einen Pol ausstrahlen. In einem plastisch verbogenen Steinsalzkristall würden auch die Durchschlagsbahnen in gleichem Sinn gebogen erscheinen, ohne daß neue Bahnen entstünden. Die ganze „Glimm-

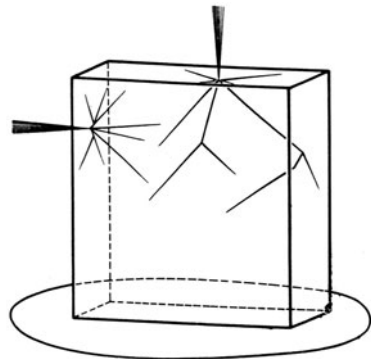


Abb. 21. Glimmfunktenkanäle in Steinsalz oder Kaliumjodid (schematisch). (Nach H. STEINMETZ).

funkenentladung“ in den Kristallen hat nach v. HIPPEL weitgehende Ähnlichkeit im äußeren Aussehen mit den von SIMPSON (56) beschriebene-

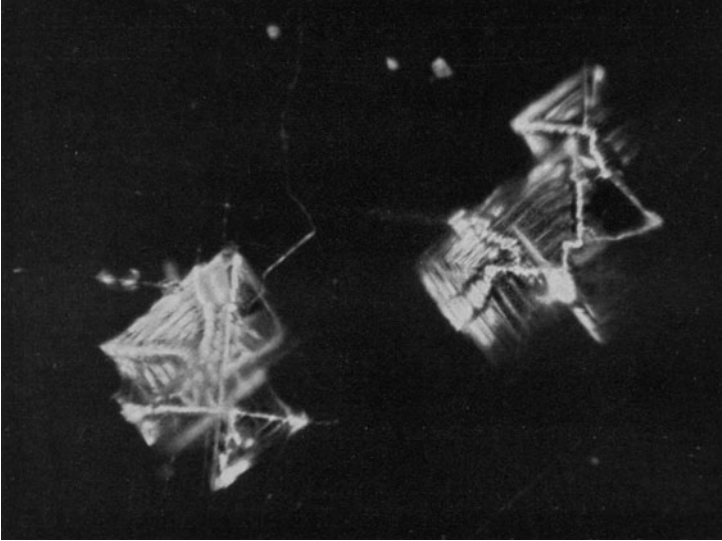


Abb. 22. Durchschläge durch ein Steinsalzplättchen. Pyramidenbildung. (Nach A. v. HIPPEL.)

nen Gesetzmäßigkeiten der Blitzbahnen oder den positiven LICHTENBERG'schen Figuren: Die Verzweigungen weisen zur Kathode hin, und der Winkel der Durchschlagsbahnen unter sich beträgt an den Gabelungen weniger als  $180^\circ$ .

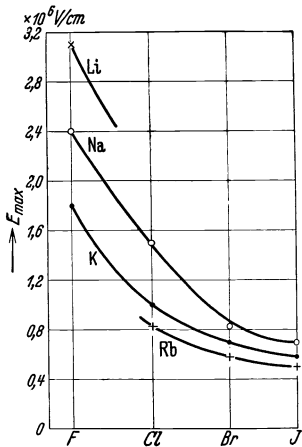


Abb. 23. Durchbruchfeldstärken der reinen Alkalihalogenide. (Nach A. v. HIPPEL.)

Die Untersuchungen an verschiedenen Alkalihalogeniden durch v. HIPPEL haben noch in einer anderen bemerkenswerten Richtung Interesse. Ändert man nämlich systematisch die Größe der Kationen in dem Gitter, so wird auch systematisch die Durchschlagsfestigkeit geändert, und zwar steigt sie an mit kleineren Kationen (Abb. 23). Man hätte also in der einfachen Gruppe der Gitter vom Steinsalztypus die Möglichkeit, systematisch die Isoliereigenschaften zu verbessern. Auch durch Mischkristallbildung und Einlagerung von Fremdstoffen in ein solches einfaches Gitter kann man die Durchschlagsfestigkeit steigern, in ähnlicher Weise wie

z. B. der elektrische Widerstand in den elektronenleitenden Metallen durch isomorphe Einlagerungen (Mischkristallreihen in Legierungen) er-

hört werden kann. Abb. 24 zeigt diese Steigerung der elektrischen Festigkeit der Mischkristalle über die der Komponenten hinaus in einem Zweistoffsystem. Die wandernden Elektronen erfahren auf diese Weise gewissermaßen eine Erschwerung ihres Durchgangs durch Erhöhung der inneren Reibung, hervorgerufen durch Änderung der Potentialschwellen und -mulden in den Hauptrichtungen des Durchgangs. Es ist bemerkenswert, daß schon durch eine Zumischung von 15% AgCl im NaCl-Gitter eine Verdoppelung der Durchschlagsfestigkeit eintritt. Eine solche isomorphe Zumischung wirkt gewissermaßen wie eine Verspannung des Gitters im mechanischen Sinne, analog der bekannten Erhöhung der Härte von Metallegierungen bei Mischkristallbildung. Nebenbei ist beachtenswert, daß auch bei Mischkristallbildung die Unterschiede der „Potentialreibung“ in den charakteristischen Kristallrichtungen sich noch verschärfen, so daß schon bei geringen Zumischungen bestimmte Richtungen als Durchschlagsbahnen geradezu ausschließlich vorherrschen.

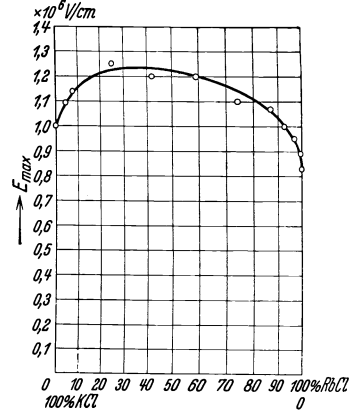


Abb. 24. Durchbruchfeldstärke in der Mischkristallreihe KCl—RbCl. (Nach A. v. HIPPEL.)

## II. Die Gitterstruktur der anorganischen Isolierstoffe.

Die hohe Leistungsfähigkeit einer Theorie dielektrischer Erscheinungen, wie sie uns in der DEBYESchen Dipolvorstellung entgegentritt, wird uns überzeugt haben von der Notwendigkeit, ein exaktes Bild von der inneren Struktur der festen Isolierstoffe zu entwerfen. Wir müssen uns dabei erinnern, daß wir in erster Linie es hier mit kristallisierten Stoffen zu tun haben, die in ihrem kennzeichnenden Gitteraufbau ihr physikalisches Verhalten bedingen. Aber auch die Gläser als Sonderfall amorpher fester Körper müssen uns in ihrem molekularen Gefüge beschäftigen, zumal sie trotz amorpher Struktur viele praktisch bedeutsame Ähnlichkeiten mit den kristallisierten Medien aufweisen. Auch ihnen werden wir daher einen gewissen räumlichen Aufbau aus einer Art Gitter zuschreiben müssen, nur von geringstem Symmetriegrad. Sowohl für die statische wie für die elektrodynamische Betrachtungsweise werden sich diese Grundannahmen bewähren können.

### 1. Typen der Kristallgitter.

a) Ionengitter, Gitter mit heteropolarem Gefüge. Bereits bei der Betrachtung der Ionenleitfähigkeit fester kristallisierter Dielektrika haben

wir gesehen, daß ihr Aufbau die Anwesenheit von geladenen Ionen, d. h. im elektrischen Felde wandernder geladener Masseteilchen verlangt.

Nach der klassischen kristallographischen Grundhypothese besteht alsdann ein derartiges kristallines Medium aus einem Verbande solcher

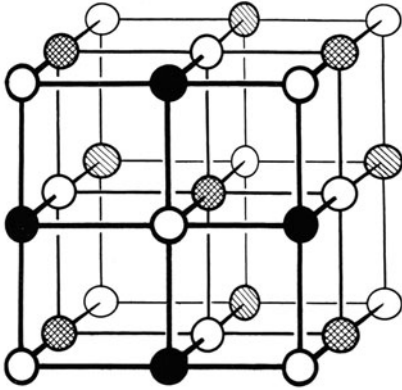


Abb. 25. Kristallstruktur des Steinsalzes.  
(Nach W. H. und W. L. BRAGG.)

Ionen, die miteinander durch elektrostatische COULOMBSche Kräfte zusammengehalten werden. Die Stabilitätsbedingungen eines solchen „Ionengitters“ verlangen eine bestimmte geometrisch-symmetrische Anordnung der Ionen im Raume. Die Zähligkeit dieser Umgebungsbedingungen führt zu dem wichtigen Begriff der Koordination, welche für die einzelnen Gittertypen und Ionen charakteristische Festwerte darstellt.

Das einfachste Beispiel, welches wir für ein solches Ionen-Koordinationsgitter geben können, ist das auch elektrisch ausgezeichnet untersuchte Steinsalz. Auf röntgenographischem Wege haben bereits 1913 W. H. und W. L. BRAGG (57) diese Struktur abgeleitet, wie sie in Abb. 25

dargestellt ist. Wir erkennen ein einfaches Gitter mit würfelförmigen Elementarzellen, auf deren Kanten sich stets Na<sup>+</sup>- und Cl<sup>-</sup>-Ionen abwechseln. Beide Ionen nehmen die charakteristischen Positionen flächenzentrierter Würfelgitter ein, die gewissermaßen ineinandergestellt erscheinen. Charakteristisch für dieses Gitter ist vor allem die Koordination beider Ionenarten; jedes Na<sup>+</sup>-Ion und jedes Cl<sup>-</sup>-Ion ist von sechs Ionen der anderen Art umgeben. Man kann unmöglich in diesem Gitter etwa ein einfaches Molekül NaCl herausgreifen, der ganze Kristall vielmehr ist ein einziges Riesemolekül, wenn man überhaupt hier noch den klassischen Molekülbegriff anwenden will.

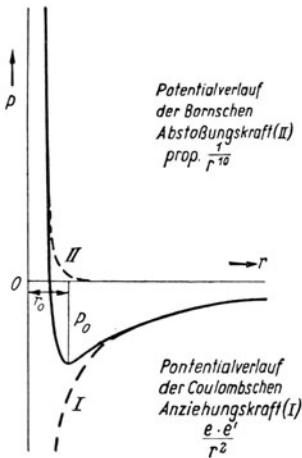


Abb. 26. Potentielle Energie zweier Ionen in Abhängigkeit vom Kernabstand. (Nach M. BORN.)

Diese Grundtatsachen im Ionengitter erlauben uns, wie dies insbesondere M. BORN (58) gezeigt hat, sowohl elektrostatisch den Gitterverband rechnerisch zu erfassen, wie auch die gesamten elektromagnetischen Eigenschaften des Kristalls elektrodynamisch abzuleiten. In statischer



Hinsicht ist die Anschauung eines Ionengitters als eines Potentialgitters fruchtbar, in welchem anziehende und abstoßende Kräfte für die Stabilität des Gitterzusammenhangs wirken. Abb. 26 zeigt die Zusammenhänge der BORNschen Anziehungs- und Abstoßungskräfte im Falle eines einfachen NaCl-Gitters, und zwar in Abhängigkeit von der Entfernung der Zentren der geladenen Ionen. Man erkennt vor allem, daß die Ionen nicht etwa wie starre elastische Kugeln aufgefaßt werden dürfen mit scharf definiertem Radius, sondern daß an der Grenze des steilen Anstiegs der Abstoßungskräfte mit der Annäherung der Ladungszentren naturgemäß eine derart intensive Hemmung eintritt, daß praktisch dennoch mit einem konstanten Ionenradius gerechnet werden kann. Diese Erkenntnis ist für die Ableitungen von PAULING (59) und V. M. GOLDSCHMIDT (60) wichtig, welche unter Annahme konstanter Ionenradien die Theorie der Ionenkristallbildung bei gegebenen Verbindungstypen ausgebaut haben.

Ganz entsprechend hat die Vorstellung vom Ionengitter auch dynamisch abschließend die theoretische Ableitung der elektromagnetischen Eigenschaften der Kristalle ermöglicht. Die Gesamtheit der optischen, magnetischen und elektrischen Oszillationsvorgänge in einem solchen Gitter läßt sich nach BORN (57) formal-mathematisch entwickeln. Sie umfassen auch die bereits im Zusammenhang mit dem dielektrischen Verlust erwähnten Erscheinungen der Anomalien bei hohen Frequenzen, vor allem im Reststrahlengebiet.

Es erübrigt sich für uns, auf die große Zahl der möglichen Ionengittertypen hier einzugehen, welche in den vergangenen Jahren auf röntgenographischem Wege abgeleitet worden sind. Vielmehr betrifft das Gebiet der Isolierstoffe speziell die Frage, wie die Silikate einzuordnen sind. Für diese hat W. L. BRAGG (61) grundlegende Gesetzmäßigkeiten erkannt, die in der geringen Größe des hochgeladenen Siliziumions und der bedeutenden Größe des Sauerstoffions beruhen. Die Gruppe  $\text{SiO}_4^{4-}$ , also das Anion der Orthokieselsäure spielt im Aufbau aller Silikate die entscheidende Rolle. Sie ist geometrisch als tetraedische Konfiguration zu beschreiben, in welcher das kleine Si-Ion vollständig umhüllt vom Sauerstofftetraeder erscheint. Diese Gruppe ist aber nicht etwa

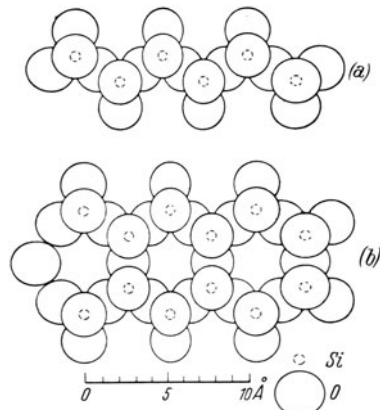


Abb. 27. Eindimensionale Kettenstruktur aus  $\text{SiO}_4$ -Tetraedern in a) Pyroxenen, b) Amphibolen. (Nach W. L. BRAGG.)

nur als solche selbständig in den Gittern möglich, sondern sie kann sich auch mit gleichgearteten verknüpfen. Es vermag sich z. B. ein Tetraeder der beschriebenen Art an das andere anzuschließen derart, daß jeweils

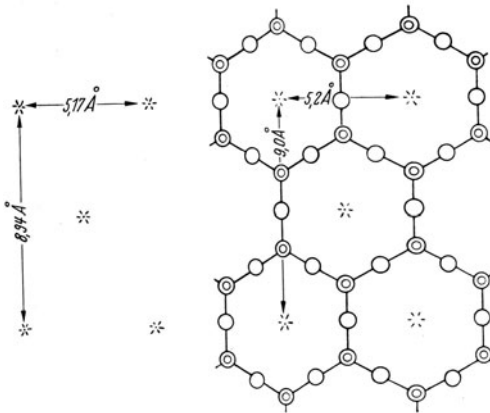


Abb. 28. Zweidimensionale Netzverknüpfung von  $\text{SiO}_4$ -Tetraedern in der Struktur der Glimmer. (Nach W. L. BRAGG.)

ein Sauerstoffion gleichzeitig zu zwei Tetraedern gehört. In diesem Fall entsteht eine eindimensionale Verkettung der Tetraeder (Abb. 27), die sich fadenförmig durch ein Gitter hindurchpflanzen kann. Auch Doppelketten dieser Art können sich bilden, wenn zwischen zwei Ketten eine Querverbindung nach dem gleichen Prinzip stattfindet. Endlich kann sich durch stetige Fortsetzung dieses Verkettungsprinzips nach zwei Dimensionen ein



Abb. 29. Räumliche Netzverknüpfung von  $\text{SiO}_4$ -Tetraedern in Sodalith. (Nach F. M. JAEGER.)

ebenes Netz (Abb. 28) von lauter Tetraederanordnungen ergeben, und analog im dreidimensionalen Raum ein räumliches Netzgebilde (Abb. 29). Die außerordentliche Mannigfaltigkeit dieser Verknüpfungstypen wird aber noch erhöht durch die Möglichkeit, an Stelle eines  $\text{SiO}_4$ -Tetraeders die völlig analoge Konfiguration  $\text{AlO}_4$  einzubauen, die ihr isomorph ist, und in der das kleine Aluminiumion vollkommen die Funktion des Siliziumions übernehmen kann. Es bauen sich so die Raumnetze von Alumosilikaten auf, die unter den Isolierstoffen eine interessante

Rolle spielen.

Wenn aber ein  $\text{Al}^{+++}$ -Ion an Stelle eines  $\text{Si}^{++++}$ -Ions tritt, so ist eine Änderung des elektrostatischen Gleichgewichtes im betreffenden Gitter zu erwarten, da Al dreiwertig, Si aber vierwertig ist. Es wird also eine positive Ladung zu wenig im Raumnetz vorhanden sein,

die auf andere Weise, z. B. durch Einbau eines einwertigen Alkaliions, z. B. des Ions  $\text{Na}^+$  zwischen die Tetraedergefüge zum elektrisch-neutralen Zustande des Gitters führt. Solche Alkali aluminosilikate dürfen wir für unseren Zweck als den Prototyp der gewöhnlichen silikatischen Isolierstoffe betrachten, bei denen durch die lockere Bindung des  $\text{Na}^+$ -Ions im elektrischen Felde Ionenleitung zustande kommt. Wir verstehen, daß in einem solchen Gitter nur die  $\text{Na}^+$ -Ionen zu wandern vermögen, nicht aber die Anionen, die in dem Netzwerk festgelegt sind. Erdalkaliionen, z. B. Kalziumionen können naturgemäß an Stelle des Natriums auch eintreten, werden aber durch ihre höhere Ladung stärker an das Netzwerk gebunden, so daß auch sie relativ unbeweglich verbleiben. Erst bei höheren Temperaturen, also nach Zerstörung des Gitterverbandes in der Schmelze werden auch sie sich am Ionenleitungsvorgang beteiligen können. Unter den Alkaliionen ist nur das kleine Natrium und das noch kleinere Lithiumion bei niedrigen Temperaturen als Träger der Ionenleitung befähigt; sie können gewissermaßen durch die Lückenräume des Netzwerks hindurchschlüpfen. Schon das größere Kaliumion ist behindert.

Stellen wir uns andererseits vor, daß die Netzwerkbildung der  $\text{SiO}_4$ -Tetraeder räumlich immer weiter geht, bis schließlich der ganze Kristall nur aus ihnen gefügt ist, so haben wir das Urbild der Kristallstruktur der reinen Kieselsäure vor Augen. In diesem wären Natriumionen als Ionenleiter nur noch als Fremdstoffe zu betrachten, bei ihrer Abwesenheit müßte die reine kristallisierte Kieselsäure einen idealen Isolator darstellen, da sie nur völlig starre, im elektrischen Felde nicht ablösbare Bindungen enthält. Obwohl im einzelnen betrachtet jedes Tetraeder noch immer aus Ionen des Siliziums und des Sauerstoffs als Bausteinen besteht, wäre ein solches abgeschlossenes Gefüge elektrisch indifferent. Ein derartiges Gitter wäre also entgegengesetzt dem reinen Koordinationsgitter vom  $\text{NaCl}$ -Typus, das nur bewegliche, von allen Seiten dem elektrischen Felde offene Bindungen enthält. Wir stehen bei solchen neutralen Gittern bereits auf der Schwelle zu dem anderen Gittertypus, dem der reinen Valenzbindungen.

**b) Homöopolare (unpolare) Gitter.** Der Ionenbindung steht in der Chemie ein zweiter Bindungstypus gegenüber, den man als den der Valenzbindung zu bezeichnen pflegt. Als Prototyp eines derartigen Gitters wählen wir die Struktur des kristallisierten Chlors nach KEESOM und TACONIS (62) (1936) (Abb. 30). In der Elementarzelle erkennen wir hier nur die Gruppe  $\text{Cl}_2$  als Baustein, also das bekannte Chlormolekül. Man könnte ein solches Gitter mit vollem Recht als ein Molekülgitter bezeichnen. Dieses zweiatomige Molekül hat nach den Vorstellungen von LEWIS (63) ein elektrostatisch definiertes Gefüge; es werden in diesem Fall nicht polar entgegengesetzte Ladungen durch COULOMBSche Kräfte gebunden bzw. durch Abstoßungskräfte auseinandergelassen, sondern

die Außenelektronen der Atome, die „Valenzelektronen“, umkreisen nunmehr beide die Kernladungen gemeinsam, „gekoppelt“. FAJANS (64) gibt dafür die in Abb. 31 anschaulich dargestellte Gegenüberstellung zu der Ionenbindung. Während bei dieser im idealen Fall die Elektronenbahnen getrennt verbleiben und die Elektronen der Außenschalen das Wirkungsbereich der Atome nicht verlassen, ist bei der Atombindung ein Verschmelzen der Wirkungsbereiche zu beobachten, das zu einer völligen Unpolarität nach außen führt. Zwischen beiden Extremen kann es allerdings Übergänge geben, die z.B. bei den Silikatgittern bedeutsam sind.

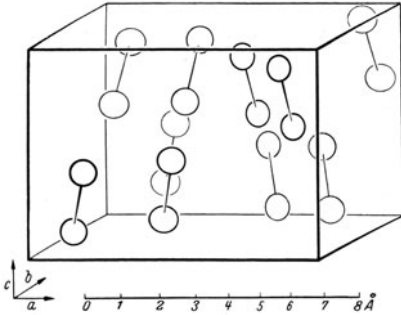


Abb. 30. Kristallstruktur des Chlors.  
(Nach W. H. KESOM und K. W. TACONIS.)

Die Molekülgitter der genannten Art zeigen eine weitgehende Verwandtschaft auch mit den organischen Verbindungen, z. B. den einfachsten vom Typus des Methans und der Paraffine. Bei diesen Stoffen

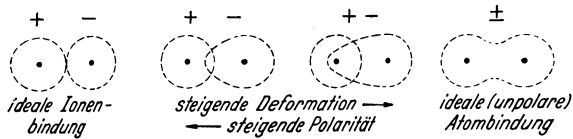


Abb. 31. Ionen- und unpolare Atombindung. (Nach K. FAJANS.)

ist die Bildung von Ketten und Netzen in der Ebene und im Raum bereits ganz ähnlich im äußeren Typus wie bei den entsprechenden

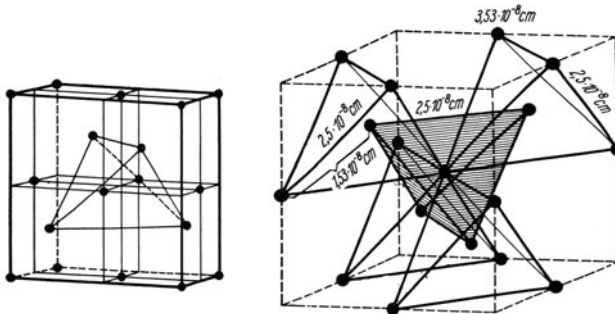


Abb. 32. Kristallstruktur des Diamanten. (Nach W. H. und W. L. BRAGG.)

Bildungen der Silikate. Allerdings ist der Vorgang der Bildung der unpolaren Konfigurationen bei den aliphatischen Stoffen als typische Valenzbindung zu erkennen. Die Valenzelektronen verlaufen in ge-

koppelten Bahnen geschlossen, während bei den  $\text{SiO}_4$ -Verknüpfungen noch ionogene Bindungen des Übergangstypus bestehen. Der Idealtypus der aliphatischen Kohlenstoffverknüpfung begegnet uns im Diamant, dessen Struktur gemäß Abb. 32 nach W. H. und W. L. BRAGG (65) tetraedrischen Aufbau zeigt.

Der ganze Kristall ist hier wiederum ein einheitliches Riesenmolekül, aber es sind keine freien Elektronen vorhanden und auch keine freien Ionen, die eine Leitfähigkeit vermitteln könnten. Mit diesem Bilde des typischen „Makromoleküls“ im Diamanten steht in sehr weitgehender Analogie die bereits in großen Zügen entworfene Struktur der  $\text{SiO}_2$ -Modifikationen. Auch in ihnen haben wir Moleküle vor uns, die jeweils das ganze Kristallgebäude umfassen. Auch die räumliche Anordnung der tetraedischen Verknüpfung stimmt z. B. für den Cristobalit mit der des Diamanten überein. Verschieden ist allein die vollständige Geschlossenheit der Elektronenkopplung bei diesem, die mehr zu den Ionengittern vermittelnde bei den  $\text{SiO}_2$ -Modifikationen.

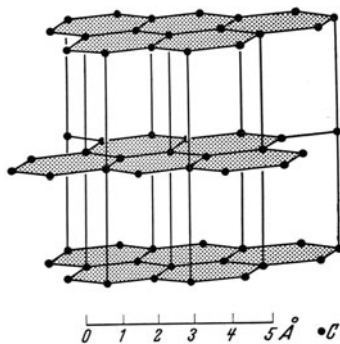


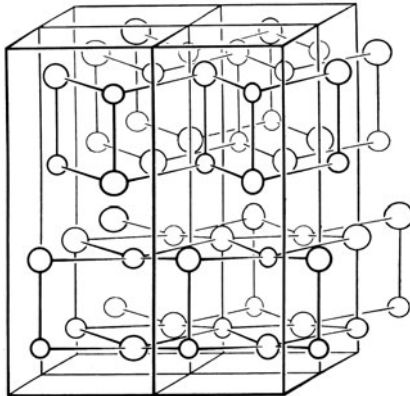
Abb. 33. Kristallstruktur von Graphit.  
(Nach O. HASSEL und H. MARK.)

Einem anderen merkwürdigen Fall der Molekülgitter begegnen wir bei den aromatischen Kohlenstoffverbindungen, welche die bekannten geschlossenen Sechseringe des Benzolkerns und der höheren Grundtypen umfassen. Der Idealtypus der aromatischen Gruppe ist der Graphit, in dessen Kristallstruktur nach HASSEL und MARK (66) (Abb. 33) zum Unterschied vom Diamanten auch die kennzeichnende Netzbildung in der Basis auftritt, aber eine lockere Schichtenbildung senkrecht zu dieser Ebene. Innerhalb der Schichten von hexagonalen Kohlenstoffnetzen herrscht unpolare Bindung; senkrecht zur Basis ist eine Art von metallischer Bindung zu erkennen. Jedenfalls ist das in Richtung der Hauptachse angeordnete Elektron frei beweglich, und es kommt Elektronenleitfähigkeit zustande. Wir sehen daraus, daß es von Molekülgittern sogar Übergänge zu den metallischen Kristallen geben kann.

Große Ähnlichkeit zu der Graphitstruktur zeigen andere Molekülverbindungen mit ausgesprochener Schichtstruktur, die salzartigen Charakter haben, aber dennoch schlechte Ionenleiter sind, wie  $\text{CdJ}_2$  und das von HELMHOLZ (1936) untersuchte  $\beta$ -Thallogjodid (67) (Abb. 34). Hier ist die Bindung in der festgefügtten Schicht parallel zur Basis ionogen, senkrecht zur Basis aber in recht lockerem Zusammenhalt gegeben. Dieses Kennzeichen ist der sehr großen Gruppe von Schicht-

kristallgittern gemeinsam, die mechanisch nach der Tafelebene besonders leicht spaltbar sich verhalten. In der Silikatfamilie sehen wir darin ein Beispiel in der Glimmergruppe, die besonders gute basale Spaltbarkeit aufweist.

Der Übergang von typisch unpolaren zu heteropolaren Bindungen im Kristallgitter scheint bei Silikaten und verwandten Verbindungen auch dielektrisch für das Zustandekommen spezieller Eigenschaften nicht ohne Bedeutung zu sein. So hat EUCKEN mit BÜCHNER (68) theoretisch die ausnehmend hohe Dielektrizitätskonstante des Kristalls von Rutil auf einen derartigen Zusammenhang



$$\frac{c}{a} \frac{b}{a}$$

0 1 2 3 4 5 6 7 Å

○ π

○ J

Abb. 34. Kristallstruktur von  $\beta$ -Thalloyodid.  
(Nach L. HELMHOLTZ.)

gedeutet. Es kann z. B. dielektrische Verschiebung von schwach polaren Ionenverbindungen vorkommen, welche eine erhebliche Steigerung der DK mit sich bringt. Physikalisch zeigt sich diese auffallende Erscheinung auch mit einem eigenartig flachen Verlauf der Reflexion bei den Frequenzen im Reststrahlgebiet verbunden, wie dies RUBENS (69) an Rutil, AgCl usw. gezeigt hat. Im Sinne der FAJANSSchen (64) Anschauungen sind hier Fälle zu erkennen, in welchen die Valenzelektronen nicht vollständig mit den Anionen gekoppelt sind, sondern auch schwach an die Kationen über-

gehen. Dann ist eine gewisse Labilität des Ladungszustandes gegeben, welche zu der hohen DK führt. Im Falle der vollkommen unpolaren Bindung, bei dem die Valenzelektronen gleichmäßig an die verschiedenen Atomarten gebunden sind, also im echten Molekülgitter, ist die DK wieder vollkommen normal zu erwarten. Vielleicht ist dies bereits beim  $\text{SiO}_2$ -Gitter der Fall, sicher beim Diamanten.

c) Realkristalle und Gitteranomalien. Die BORNSche Gittertheorie und die Potentialberechnung an Ionengittern geben uns heute die Möglichkeit, aus dem speziellen Gittergefüge einer gegebenen Verbindung ihre mechanische und elektrische Festigkeit zu berechnen. Wir können z. B. den Arbeitsaufwand berechnen, der nötig ist, um einen Kristall in zwei Hälften längs einer Gitterebene zu zerlegen, oder ein Ion aus seiner Gleichgewichtslage im Gitterverbande herauszulösen. Für den elektrischen Durchschlag erhält man auf diese Weise eine exakte Grundlage der idealen Festigkeit [vgl. ROGOWSKI (43)]. Man kommt so

zu Werten der erforderlichen Feldstärke von der Größenordnung  $10^8$  V/cm. Die tatsächlich ermittelten Zahlen für die maximale vor dem Durchschlag bestehende Feldstärke liegen aber bei der Größenordnung  $10^5$ — $10^6$  V/cm. Dies entspricht durchaus den analogen Erfahrungen, daß auch die mechanische Zerreißfestigkeit der Kristalle weit unter dem theoretisch berechneten Wert liegt. Ein interessanter Grenzfall der Annäherung an die theoretisch erreichbaren elektrischen Festigkeiten findet sich allerdings nach JOFFÉ (70) bei sehr dünnen Schichten des Dielektrikums, für welche gemäß Abb. 35 ein Grenzwert hoher Feldstärken erreicht wird.

Zum Verständnis dieser offenbaren Anomalien haben wir uns zu erinnern, daß wir bisher die Kristalle als vollkommen ideale Gitter betrachtet haben, also ohne alle Störungen und Zufälligkeiten, die beim Wachstum in der Natur wohl unvermeidlich sind. Die natürlich gebildeten Realkristalle ebenso wie die im Laboratorium gewonnenen sind von jenem Idealbild des regelmäßigen Gitterbaues weit entfernt. Es ist also notwendig, sich über die Störstellen, oder wie sie von SMEKAL (71) bezeichnet worden sind, „Lockerstellen“ ein umfassendes Bild zu machen. Sie sind offenbar Schwächestellen, die zur Herabsetzung der theoretisch verlangten Festigkeitswerte führen.

Die Lockerstellen können dabei sehr verschiedener Natur sein; sie können lediglich Wachstumsanomalien einbegreifen, aber auch Einlagerungen von Fremdbestandteilen, z.B. von Fremdionen im Gitterverband. Um solche ist dann die Bindung der Ionen aufgelockert, die „Ablösungsarbeit“ also bedeutend herabgesetzt gegenüber dem normalen Ionenverband des Gitters. Diese Vorstellungen sind besonders fruchtbar, um auch den Ionenleitungsvorgang bei festen kristallisierten Stoffen (und übertragen auch bei Gläsern) zu beschreiben: bei tiefen Temperaturen kommt zunächst nur die Ablösung der Lockerionen in Betracht, diese allein vermitteln den Stromdurchgang. Nach einer genügenden Erhöhung der Temperatur setzt auch allmählich gemäß der Exponentialfunktion des Leitvermögens der Gitterionen deren Anteil immer mehr neben dem der Lockerionen ein. Schließlich treten die Gitterionen in den Vordergrund gegenüber den Lockerionen, so vor allem

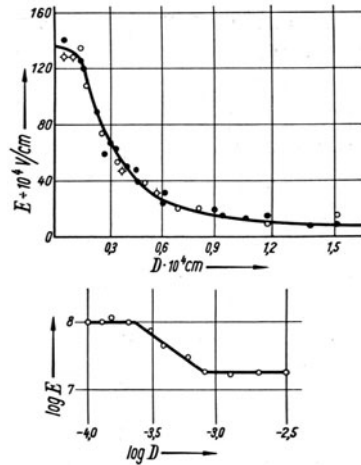


Abb. 35. Zunahme der Feldstärke beim Durchschlag mit abnehmender Schichtdicke (NaCl).  
(Nach A. F. JOFFÉ.)

in der Nähe des Schmelzpunktes. Bei tiefen Temperaturen überwiegen also die Einflüsse der Gitterstörungen, die Ionenleitfähigkeit ist, wie SMEKAL sich ausdrückt, „empfindlich“ gegen Störungen des Gittergefüges, bei hohen Temperaturen ist die Leitfähigkeit dagegen „unempfindlich“ geworden. Diese Anschauung erklärt erschöpfend die wirklichen Verhältnisse bei Realkristallen. Von erheblicher Bedeutung ist im Sinne der SMEKALSchen Theorie, daß an die Stelle des einfachen RASCH-HINRICHSSENSchen Gesetzes der Temperaturabhängigkeit des Leitvermögens nunmehr eine Überlagerung zweier für sich jeweils exponentiell verlaufender Einflüsse zu treten hat:

$$L = A_I \cdot e^{-E_I/T} + A_{II} \cdot e^{-E_{II}/T} \quad (E_I, E_{II} \text{ die Ablösungsarbeiten}).$$

(Über die Verhältnisse bei Halbleitern s. S. 2 Anm. unten.)

Ihre besondere Bedeutung hat die SMEKALSche Theorie bei den Gläsern, bei welchen die Bildung von Lockerionen sehr leicht im elektrischen Leitvermögen zu erkennen ist und die Zusammenhänge mit der Struktur sich sehr übersichtlich gestalten.

In neuester Zeit hat die Vorstellung von nicht idealen Gitterstrukturen noch eine wesentliche Verfeinerung dadurch erfahren, daß man auch die Grundforderung der völlig homogenen Atom- und Ionenverteilung gemildert hat, welche in der geometrischen Gittertheorie enthalten war. Während diese forderte, daß in einem homogenen Gitter alle Ionen nur die ihnen eigenen Lagepunkte einnehmen können, hat man erkannt, daß auch weniger regelmäßige Anordnungen vorkommen, in welchen statistische Verteilungen bestimmter Ionen, unter Umständen aber auch Lücken der Besetzung und sogar überzählige Ionen im Gitter vorhanden sein können. Derartige Lücken und unregelmäßige Besetzungen würden dann genau so wirken wie SMEKALSche Lockerstellen.

Ganz besonders wichtig wird dieses Problem aber bei der Beurteilung des Verhaltens isomorpher Substituenten im Gitter; gerade die Mischkristallbildung spielt in den Silikaten eine überaus wichtige Rolle und ist von erheblichem Einfluß auf ihr Verhalten als Dielektrikum. So müssen also die von STROCK (72) untersuchten und systematisch behandelten Effekte unvollkommener Gitterbildung in besonderem Maße für die Beurteilung des Verhaltens von Realkristallen Berücksichtigung finden.

## 2. Das Gefüge der Gläser.

a) **Theorie der Glaskolloide.** Die Eigenart der Gläser, daß sie bei hohen Temperaturen in echte Schmelzlösungen mit ausgesprochenem Ionenleitvermögen und elektrolytischer Dissoziation übergehen, darin also ganz den gewöhnlichen Sauerstoffsalzen entsprechen, — andererseits ihre Analogie zu amorphen Stoffen, z. B. der organischen Chemie, hat ein



hohes Interesse für ihre Erkenntnis als Dielektrika. Sie vereinen also die Charakterzüge einer großen Gruppe von ausgesprochenen Elektrolyten mit denen der kolloidalen Stoffe. Diese Analogie geht sehr weit, wenn wir z. B. auch manche der heute in großer Zahl entwickelten Polymerisationsharze, der sog. Kunstharze und anderer glasartig durchsichtiger Produkte mit ihnen vergleichen. Infolgedessen sind zahlreiche theoretische Vorstellungen der amorphen Natur der Gläser als kolloidartiger Stoffe in der Literatur entwickelt worden. Man verglich z. B. den Er-

Zustand	Kieselsäureglas	Alkali-Silikatglas	Alkali-Kalk-Silikatglas
Der flüssige Zustand enthält im idealen Falle:	nur Moleküle der Form $-SiO_2-$ symbolisch: $Si$	Ionen und Moleküle symbolisch: $Na^+ \ominus -SiO_3^- - Si$	Ionen und Moleküle symbolisch: $Na^+ Ca^{++} \ominus Si$
bei der Aggregationstemp. bilden sich:	Polymere von der Form $-SiO_2 - SiO_2 - SiO_2 - u. s. w.$ symbolisch: $(Si)$	auch Polymere der Form $-SiO_2 - SiO_3^- - SiO_2 -$ symbolisch: $(SiO_3^-)$	auch Polymere der Form $-SiO_2 - SiO_3^- - SiO_2 -$ symbolisch: $(SiO_3^-)$
im viskosen Zustand ergibt ein winziger Ausschnitt etwa das molekulare Bild:			
bei der Transformationstemp. erfolgt:	Anlagerung der niederpolymerisierten an die höherpolymerisierten Moleküle	Anlagerung insbesondere der $Na^+$ -Ionen an die $SiO_2 - SiO_3^-$ -Komplexe	Anlagerung $Na^+$ -Ionen auch an die $Ca - SiO_2 - SiO_3^-$ -Komplexe in geringerer Anzahl als an die $SiO_2 - SiO_3^-$ -Komplexe
im spröden Zustand ergibt ein winziger Ausschnitt etwa das molekulare Bild:			

Abb. 36. Aggregationsvorgänge bei Abkühlung geschmolzener glasiger Stoffe (schematisch).  
(Nach E. BERGER.)

weichungsvorgang des Glases bei steigender Temperatur mit der Verflüssigung eines mehrphasigen Kolloidgeles.

Besonders aber versuchte man das Molekulargefüge der Gläser sich durch Polymerisationsvorgänge verständlich zu machen; mit fallender Temperatur sollte eine weitgehend elektrolytisch dissoziierte Salzschmelze der im Glas anzunehmenden Kieselsäuresalze allmählich durch „Aggregation“ in ein viskoses Gemenge von kettenartig verknüpften Komplexen übergeführt werden. Schließlich tritt eine Verfestigung durch Bildung eines starren Gerüstes ein, an welchem die leichter beweglichen Ionen (vor allem  $Na^+$ ) anhaften. Es ist auf diese Weise verständlich, wenn auch nur in rohen Umrissen, daß das Glas bei tiefsten Tempera-

turen durch die sehr gehemmte Beweglichkeit dieser Ionen ein unpolarer Ionenleiter ist. Bei gesteigerter Temperatur lockert sich umgekehrt der starre „spröde“ Zustand unter diskontinuierlicher Zunahme des Leitvermögens beim „Transformationspunkt“; schließlich tritt bei höchsten Temperaturen unter Überwindung der Aggregationen der ideale Zustand eines „geschmolzenen Salzes“ mit bipolarem Leitvermögen ein.

Um die bei den praktisch wichtigsten Typen des Kieselglases und des Natron-Kalk-Silikatglases herrschenden Zustandsänderungen im Temperaturgebiet anschaulich darzustellen, hat E. BERGER (73) eine Tafel entworfen, die schematisch diese konstitutiven Verhältnisse zum Ausdruck bringt (Abb. 36). Das Bild veranschaulicht gut die eigenartige

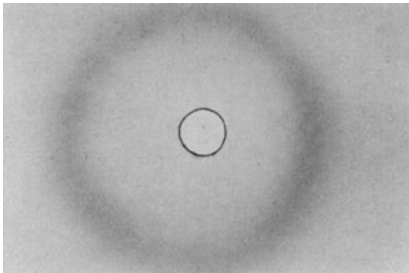


Abb. 37. Interferenzring von glasigem Siliziumdioxid. (Nach B. E. WARREN.)

Agglomeration der Silikatreste mit hohem Molekulargewicht, die durch Zusammentritt der Kieselsäurekomplexe entstehen. Die eigenartige Rolle der Kalziumionen, welche zum Unterschied von den Natriumionen nicht frei beweglich verbleiben, sondern sich schon sehr bald an die Kieselsäurekomplexe anlagern, infolgedessen sich bei der elektrolytischen Überführung nicht beteiligen, sowie die Fest-

legung der Anionen in dem kennzeichnenden Gerüst tritt gut in die Erscheinung. Das Schema veranschaulicht auch gut, welche ausgezeichneten Isolareigenschaften das Kieselglas zeigen muß, wenn es von den letzten Resten der Alkaliionen befreit werden könnte.

Dennoch ist dieses Schema nur ein Notbehelf, der uns nicht in allem zu befriedigen vermag. Wir müssen uns vielmehr fragen, ob etwa die Röntgenuntersuchung an den Gläsern neue, darüber hinausgehende Gesichtspunkte ergeben hat. Analog zu den Ergebnissen an manchen Gelen der Kolloide glaubte z. B. RANDALL (74) den Nachweis erbracht zu haben, daß im Kieselsäureglas eine äußerst feine Dispersion von Cristobalit vorhanden sei. Wenn z. B. in ultramikroskopisch nicht mehr auflösbaren Kolloidlösungen des Goldes von DEBYE und ZSIGMONDY immer noch das metallische Gold in Kriställchen von der Größenordnung weniger  $m\mu$  nachgewiesen wurde, so glaubte RANDALL in den charakteristischen Röntgeninterferenzen des Kieselglases die stärksten Linien des Cristobalits wiederzuerkennen. Man kann aus Ansätzen von SCHERRER (75) aus der photometrisch ermittelten Breite dieser Interferenzringe (Abb. 37) die Größe der angenommenen Cristobalitkriställchen berechnen, und kommt dann zu Werten, die größenordnungsmäßig mit den an kolloidem

Gold ermittelten Dispersionen übereinstimmen. Stellt man sich mit RANDALL auf den Standpunkt, daß dieses Verfahren noch zuverlässig genug zur Entscheidung der Frage nach der Natur des Glases ist, so kann man wenigstens für die Kieselsäure aussagen, daß deren Glas nur ein äußerst feines Kristallitengemenge der Modifikation Cristobalit darstellte. VALENKOV und PORAY-KOSHITZ (76) haben sich auf Grund ausführlicher Untersuchungen dieser Anschauung angeschlossen.

**b) Netztheorie der Gläser.** Die gleichen Röntgeninterferenzen erfuhren aber von WARREN (77) eine andersartige Deutung. WARREN schließt sich nämlich einer Theorie der isotropen Verteilung der Atome und Ionen, also einer rein statistischen

Anordnung an, welche ZACHARIASEN (78) in Analogie zur Gittertheorie entwickelt hat. Nach ZACHARIASEN ist das Verknüpfungsprinzip der Kieselsäure im glasigen Zustand tatsächlich nicht viel verschieden vom kristallisierten Zustand z. B. des Cristobalits, nur darin, daß die Anordnung der kennzeich-

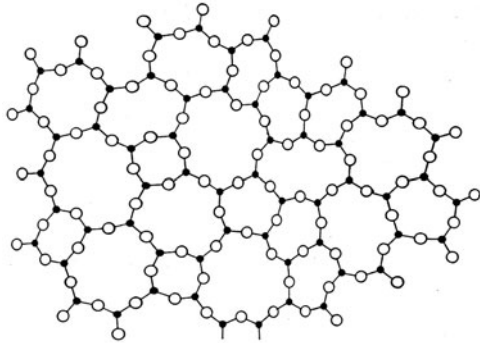


Abb. 38. Netzwerk von  $\text{SiO}_4$ -Tetraedern im Glas.  
(Nach W. H. ZACHARIASEN.)

nenden  $\text{SiO}_4$ -Tetraeder nicht periodisch-regelmäßig im Raume stattfindet, sondern unsymmetrisch. Man kann sich davon gemäß Abb. 38 ein Bild machen, nur mit dem wichtigen Bemerkten, daß die dort gezeigte ebene Netzanordnung der sich verknüpfenden Si- und O-Atome bzw. -Ionen sich räumlich zu vervollständigen hätte, so daß ähnliche Raumkonfigurationen entstehen, wie etwa in Abb. 29 (S. 28) aber unperiodisch.

WARREN unternahm es, die kennzeichnende photometrisch ausgewertete Intensitätsverteilung der Röntgeninterferenzen von reinem  $\text{SiO}_2$ -Glas unter diesen Voraussetzungen der Theorie von ZACHARIASEN zu berechnen. Das Ergebnis ist eine weitgehende Bestätigung der in Abb. 38 angedeuteten Anordnung, die in ihrer räumlichen weitmaschigen Struktur weiterhin auch der Möglichkeit der Aufnahme von Kationen wie vor allem  $\text{Na}^+$ -Ionen das Tor öffnet. Erinnern wir uns also der in Abb. 36 gegebenen noch etwas schematischen Vorstellung vom Kolloidgefüge des Glases, so erscheint sie uns als durch die WARRENSche Ableitung weitgehend präzisiert. Es wird auch in dem leicht der Vorstellung zugänglichen räumlichen Modell des Glasgefüges bei Einhaltung der tatsächlich theoretisch geforderten Abstände verständlich, wie selbst bei tiefen Temperaturen, also bei weitgehender Starrheit der  $\text{SiO}_4$ -Netze dennoch die Natriumionen wegen ihrer Kleinheit durch die Hohlräume des Gitters

schlüpfen, also eine elektrolytische Leitfähigkeit vermitteln können. Ja, man kann die sehr bemerkenswerte Durchlässigkeit des weitmaschigen Kieselglasgefüges (79) für kleine Atome, z. B. für Helium bei erhöhter Temperatur, bei der sich die Räume noch ausweiten müssen, sehr anschaulich verständlich machen.

Wir können heute noch nicht endgültig entscheiden, ob die WARREN-ZACHARIASENSCHE Netztheorie oder die RANDALLSche Kristallitenhypothese den Vorzug verdient. Vielleicht liegt die Wahrheit in der Mitte, daß innerhalb gewisser Bereiche die kristalline, in anderen statistisch die unperiodische Anordnung überwiegt. Zweifellos ist aber in beiden ein anschauliches Bild vom Gefüge der Gläser entworfen, mit dem man zum Verständnis ihrer Eigenschaften erfolgreich operieren kann.

Die Netztheorie gibt auch in bester Übereinstimmung mit der Erfahrung der Glastechnik anschaulich wieder, weshalb Tonerde, Borsäure usw. in die Struktur des Glases eingelagert werden können. Tonerde wird in das Netzgefüge ohne weiteres aufgenommen durch Bildung der isomorphen  $AlO_4$ -Gruppen (s. o.), ebenso die Phosphorsäure, welche die Gruppen  $PO_4$  bildet. Das Tetraedernetzwerk wird durch deren Einlagerung in keiner Weise unterbrochen. Bei der Borsäure ist die ebene Konfiguration  $BO_3$  typisch, die sich ebenfalls völlig in das Netzwerk eingliedert. So kommt es zur Bildung der praktisch so wichtigen Boro-Silikatgläser, die gerade als Dielektrika besonderes Interesse haben.

### 3. Gitter der speziellen kristallisierten und glasigen Isolierstoffe.

Es ist nunmehr notwendig, die typischsten Gittereigenschaften der als hochwertige Isolierstoffe verwendeten Stoffe aus der Struktur zu erörtern. Wir beginnen mit der Betrachtung der Aluminiumsilikate, welche chemisch die Zusammensetzung  $Al_2SiO_5$  haben und von denen sich der wichtigste Bestandteil der Porzellane, der Mullit ableitet.

Die Untersuchung der Aluminiumsilikate betrifft zunächst die Polymorphie dieser Verbindung  $Al_2SiO_5$ , kommt sie doch in drei verschiedenen Kristallarten in der Natur vor, dem triklinen Disthen, dem rhombischen Andalusit und dem ebenfalls rhombischen Sillimanit. Das Grundprinzip der röntgenographisch von TAYLOR (80) ermittelten Strukturen ist das Vorkommen diskreter  $SiO_4$ -Tetraedergruppen, die voneinander unabhängig sind. Abb. 39 zeigt die kennzeichnenden Unterschiede der drei Strukturen, die vor allem in der verschiedenen Koordination des Al-Ions mit Sauerstoff bestehen: während beim Disthen das Al-Ion nur mit sechs O-Ionen oktaedrisch koordiniert ist, erscheint es bei Andalusit auch mit fünf, und beim Sillimanit mit vier O-Ionen, hier also tetraedrisch gruppiert. Übereinstimmend ist in der Richtung der *c*-Achse bei allen drei Kristallarten eine Verkettung von lauter  $AlO_6$ -Gruppen derart, daß immer zwei O-Ionen je zwei benachbarten Oktaedern  $AlO_6$  ange-

hören. Diese Ketten, welche also die Bruttozusammensetzung  $\text{AlO}_4$  zur Formel beitragen, werden nun durch die  $\text{SiO}_4$ -Tetraedergruppen miteinander verbunden, außerdem noch mit den restlichen  $\text{AlO}_6^-$  bzw.  $\text{AlO}_5^-$  oder  $\text{AlO}_4^-$  Gruppen.

Praktisch wichtig ist die Tatsache, daß bei höheren Temperaturen Disthen und Andalusit in den Sillimanittypus übergehen, daß also nur

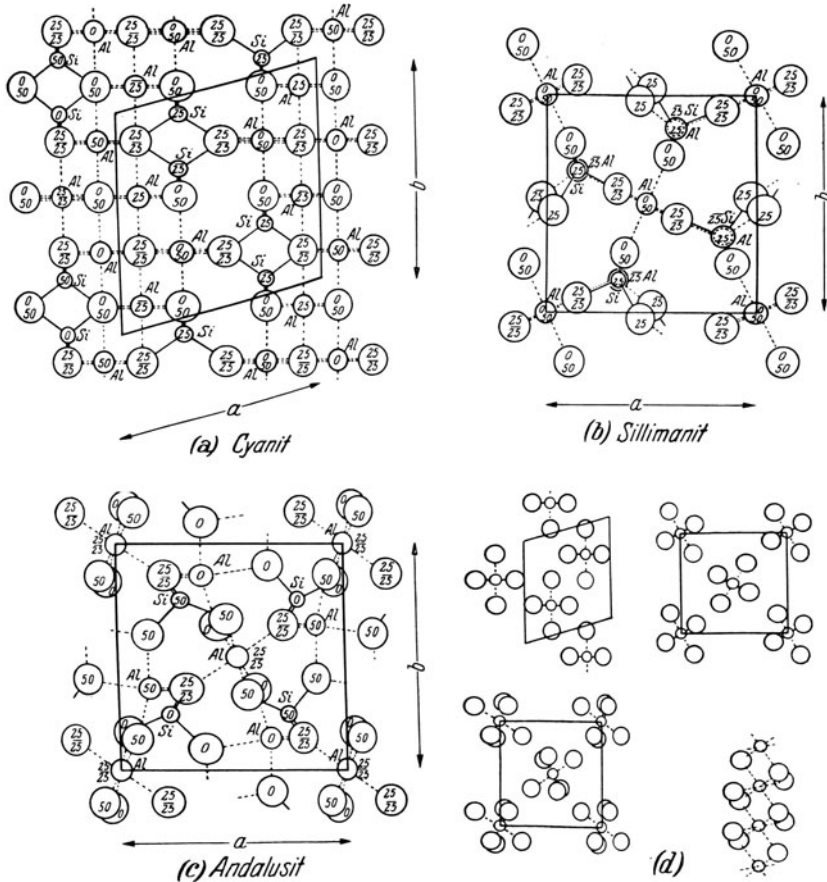


Abb. 39. Projektionen der Struktur der Aluminiumsilikate  $\text{Al}_2\text{SiO}_5$ . (Nach W. H. TAYLOR.)

die  $\text{SiO}_4^-$  und  $\text{AlO}_4^-$ -Verknüpfung einem stabilen Gittertypus entspricht. Merkwürdig ist dabei, daß das Übergangsprodukt nicht genau dem Sillimanit der Natur entspricht, sondern nach BOWEN und GREIG (81) einer Verbindung  $3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$ , dem sog. Mullit. Diese Kristallart gleicht dem Sillimanit äußerlich sehr weitgehend, sie hat auch nach TAYLOR (80) den gleichen Bautypus im Gitter; aber in ihr sind — offenbar statistisch —

teilweise die  $\text{SiO}_4$ -Tetraeder durch die Gruppe  $\text{AlO}_4$  ersetzt. Daß dies ohne Raumbehinderung angeht, haben wir schon gesehen. Das elektro-neutrale Gleichgewicht des Gitters wird dabei auf sehr eigenartige Weise erreicht; es treten Sauerstoffionen aus der Elementarzelle aus. Immer von je vier Si-Ionen des Sillimanits wird eines durch Al ersetzt, und zum

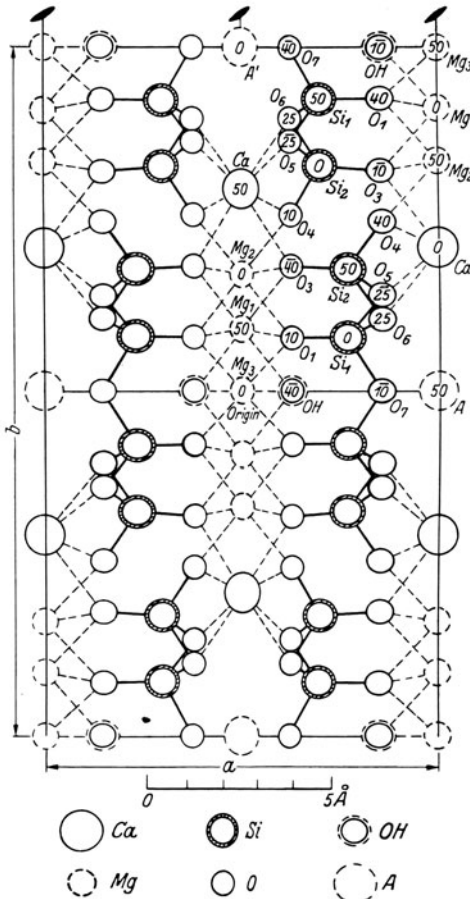


Abb. 40. Kristallstruktur des Tremolits. Projektion auf (001). (Nach B. E. WARREN.)

Ausgleich der überschüssigen negativen Ladungen müssen im Mullitgitter zwei O-Ionen austreten. Erfolgt die Auswahl der eliminierten O-Ionen statistisch, so haben wir bereits einen Fall von Lückenbildung im Realgitter [vgl. oben nach STROCK (72)].

Dem Typus einer langen fadenförmigen Kettenbildung begegnen wir bei Betrachtung der Pyroxen-Amphibolgruppe, unter denen wir die für Isolierzwecke wichtigen Asbeste bemerken. Das Bauprinzip dieser Kristallarten, die in der Natur eine außerordentliche Verbreitung besitzen, ist nach BRAGG (61) in Abb. 27 wiedergegeben. Hier erscheinen die  $\text{SiO}_4$ -Tetraeder nicht mehr voneinander unabhängig, sondern sie sind zu einfachen (bei den Pyroxenen) oder zu doppelten Ketten (bei den Amphibolen) verknüpft. Die ausgesprochene Betonung der Längsachse

in den Kristallen, in welcher diese Verkettung stattfindet, fassen wir als die Ursache der Faserbeschaffenheit der Asbeste auf. Die chemischen Verhältnisse liegen hier aber weit komplizierter als bei den Aluminiumsilikaten, da nun die Art der Verbindung der Ketten mit den kationischen Bestandteilen sehr mannigfaltig sein kann und Mischkristallbildung in beiden Strukturreihen geradezu vorherrschend wird. Es sei nur daran

erinnert, daß in den Pyroxenen sowohl die Erdalkalien, vor allem CaO und MgO, ferner auch Eisenoxydul und Manganoxydul eintreten können, endlich Tonerde und Eisenoxyd, aber auch Alkalien, Wasser und Fluor. Die einfacheren Typen, unter denen sich die eigentlichen Asbestminerale Tremolit und Aktinolith befinden — der blaue Krokydolith ist ein Natron-Eisen-Amphibol —, lassen sich am besten in Abb. 40 nach WARREN (82) beschreiben. Man erkennt, wie z. B. die Mg<sup>++</sup>-Ionen sich in einer sechsfachen oktaedrischen Koordination zum Sauerstoff befinden, während die Ca<sup>++</sup>-Ionen zwischen acht O-Ionen liegen, die die Ecken eines verzerrten Würfels besetzen. Die Bindungskräfte dieser Kationen sind offenbar weit schwächer als die der SiO<sub>4</sub>-Ketten parallel zur c-Achse, so daß sich die ausgezeichnete Spaltbarkeit parallel Fläche (110) erklärt. Die Faserung nach der c-Achse ist auch das Kennzeichen der Struktur der Serpentin- oder Chrysotil-Asbeste, deren Struktur sehr bemerkenswerte Analogien zu der der Tremolitasbeste zeigt [nach ANDERSON und CLARK (83)]. Der für beide kennzeichnende Gehalt an „Konstitutionswasser“, dessen Verlust bei höheren Temperaturen bekanntlich die Asbestfaser spröde macht, ist sehr schön in Abb. 40 zu erkennen, und zwar in Verbindung mit einem Mg<sup>++</sup>-Kation, etwa entsprechend der Bindung im natürlichen Magnesiumhydroxyd, dem Brucit. Bei seinem Austritt bleibt das Gitter als solches durchaus erhalten. Das Gefüge ist in den Zwischenräumen zwischen den Ketten bemerkenswert locker; es können leicht Einlagerungen verschiedenster Fremdionen und Lockerstellen stattfinden.

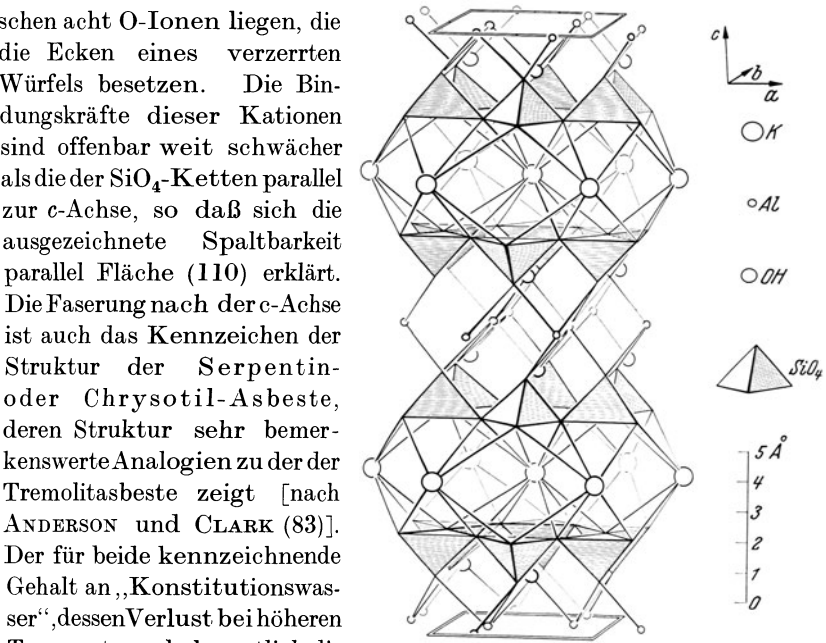


Abb. 41. Kristallstruktur des Kaliglimmers.  
(Nach W. W. JACKSON und J. WEST.)

Von PAULING (84) wurden sehr bemerkenswerte Ähnlichkeiten der genannten Kettenstrukturen mit denen der Glimmer gefunden, die zweidimensionale Netze von verknüpften SiO<sub>4</sub>-Tetraedern als Hauptbauprinzip zeigen (Abb. 27). Zunächst tritt hier der ausgezeichnet hexagonale Charakter einer solchen Netzbildung in die Erscheinung, die leicht

in monokline Symmetrie verzerrt, uns bei Glimmern, Talk, Kaolin, Chlorit und anderen Mineralien begegnet. Wir dürfen erwarten, daß die Spaltbarkeit aller dieser Mineralien nach der Basis mit der hohen Stabilität dieser Netzbildung zusammenhängt; senkrecht zu der Basis-

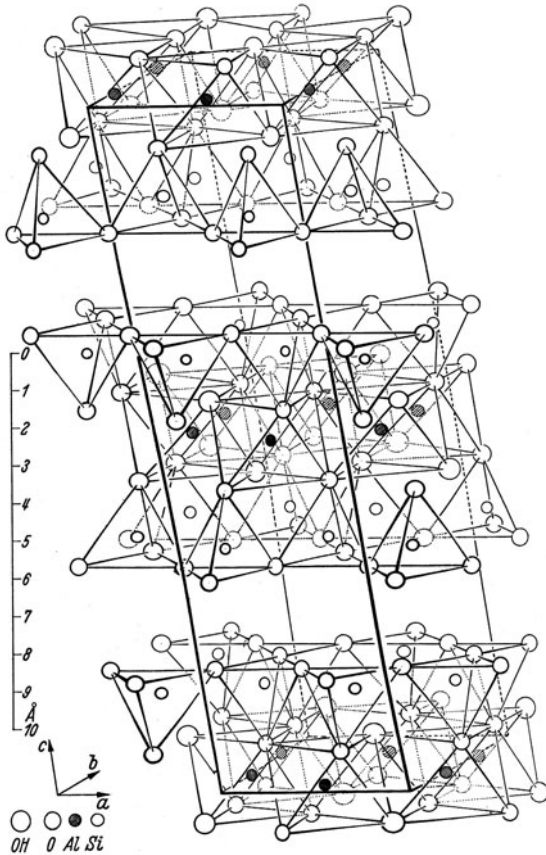


Abb. 42. Kristallstruktur des Pyrophyllits. (Nach J. W. GRUNER.)

ebene werden wesentlich schwächere Bindungen vorhanden sein. Tatsächlich ist diesen Erwartungen von der röntgenographisch ermittelten Struktur des Kaliglimmers genügt (Abb. 41) [nach JACKSON und WEST (85)].

Die chemische Mannigfaltigkeit der Verknüpfungen der Netzebenen untereinander ist allerdings eine außerordentliche, so daß nur in kurzen Zügen darauf eingegangen werden kann. Zwei hexagonale Netzebenen der geschichteten Art werden durch eine Zwischenschicht vom Hydrargillittypus verbunden [das gleiche Bauprinzip zeigt besonders deutlich der Pyrophyllit gemäß Abb. 42 nach GRUNER (86)]; diese ist eine oktaedrische Schicht von Al-

und O,OH-Ionen, entsprechend der Struktur des monoklinen Hydrargillits. Beiderseits der oktaedrischen Schicht liegen die  $\text{SiO}_4$ -Tetraedernetze, in denen nach PAULINGS Strukturbestimmung jeweils das vierte Si-Ion durch Al ersetzt ist. Da nunmehr die Schichten nicht mehr neutral sein können, ist die Möglichkeit der Einlagerung von Alkali-Ionen, z.B. von Kalium gegeben. Dessen Ionen legen sich in die sechseckigen Hohlräume der beiderseitigen Tetraederschichten ein. Das Bild der Struktur gibt diese Verhältnisse schematisch so gut wieder, daß man die geringe Festigkeit der Verbindung der Schichtenkomplexe untereinander



verstehen kann, welche die Spaltbarkeit bedingt. Die ausgezeichneten Isolationseigenschaften des Kaliglimmers werden durch die Vollständigkeit der Neutralisation der Ionenladungen nach außen verständlich, wie vor allem auch die schwer zu überwindende Festigkeit der Bindung der Alkaliionen in den Einsenkungen der Schichten.

Einen gänzlich anderen Typus zeigen uns die Raumnetze der  $\text{SiO}_4$ -Tetraeder in der Gruppe der  $\text{SiO}_2$ -Modifikationen. Unter diesen interessiert uns natürlich am meisten der ausgezeichnet untersuchte Quarzkristall.

Seine Struktur, wie sie uns Abb. 43 für die bei normalen Temperaturen stabile trigonale Form ( $\beta$ -Quarz) nach BRAGG und GIBBS (87) (1925) wiedergibt, ist gekennzeichnet durch die allseitig räumliche Verknüpfung der Tetraeder, und zwar in einem Verbande, der gleichzeitig die typische Schraubenstruktur um die Hauptachse gut erkennen läßt. Die Erscheinung der Zirkularpolarisation in Richtung der  $c$ -Achse ist damit erklärt. Auch die Polarität in Richtung der drei Nebenachsen ist anschaulich vor Augen geführt, welche die Ursache des piezo- und pyroelektrischen Verhaltens des  $\beta$ -Quarzes ist. Die Struktur ist geradezu der Prototyp eines dielektrischen Isolators, vor allem in seiner völligen Absättigung aller Ionenkräfte nach außen, gewissermaßen seiner elektrischen Geschlossenheit. Es ist also aus der Struktur wohl zu erkennen, wie berechtigt es war, wenn A. MEISSNER (88) den Quarz als einen idealen kristallisierten Isolierstoff bezeichnete,

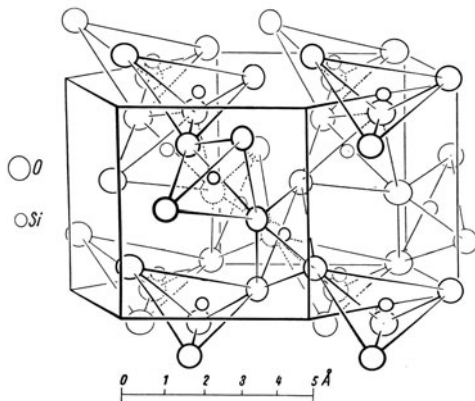


Abb. 43. Kristallstruktur des Tief-Quarzes.  
(Nach W. L. BRAGG und R. E. GIBBS.)

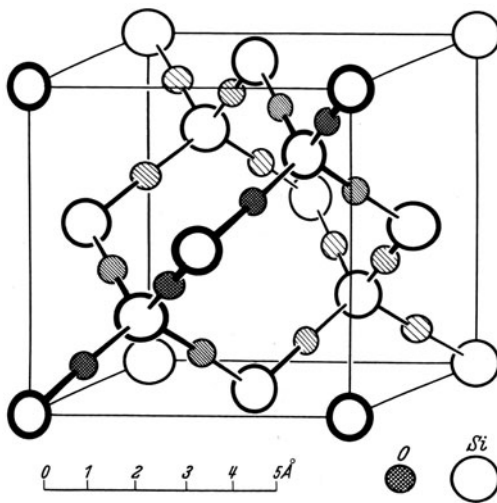


Abb. 44. Kristallstruktur des Hoch-Cristobalits.  
(Nach R. G. WYCKOFF.)

allerdings unter der Voraussetzung idealer Kristallbildung, die im Realkristall nicht streng erfüllt sein wird.

Besonders anschaulich ist ferner die Struktur des Cristobalits, der bei höchster Temperatur stabilen  $\text{SiO}_2$ -Modifikation. Nach den Strukturbestimmungen von WYCKOFF (89) (Abb. 44) ist der Cristobalit ähnlich dem Diamant gebaut. Die Si-Ionen liegen ganz entsprechend wie die Kohlenstoffatome in diesem; die Tetraeder der  $\text{SiO}_4$ -Gruppen umgeben diese Si-Zentren in regelmäßigem Netzwerkgefüge. Dieser Typus ist

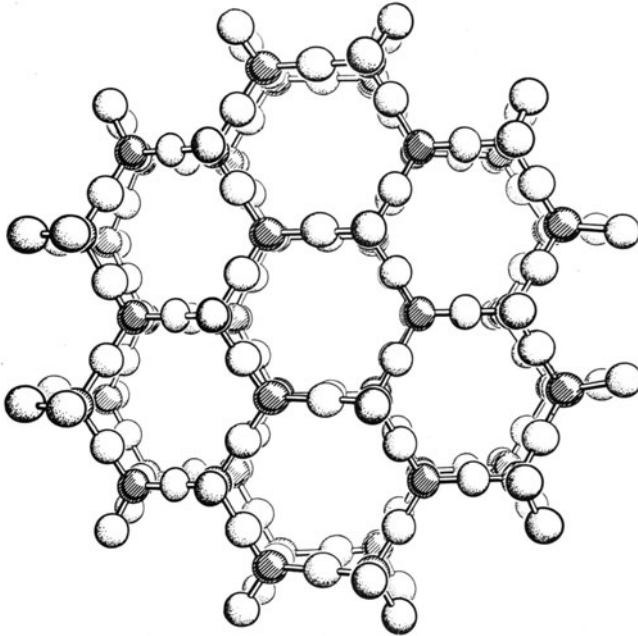


Abb. 45. Kristallstruktur des Tridymits. (Nach E. SCHIEBOLD.)

besonders verbreitet mit der Abwandlung, daß ein Teil der Si-Ionen durch Al-Ionen ersetzt ist, und der entstehende Überschuß an negativen Ladungen durch Eintritt von Kationen ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$  oder  $\text{Ca}^{++}$ ) abgesättigt wird. Wir kommen so systematisch zu den Strukturen der Alumosilikate der Nephelin-(Carnegieit-)Gruppe, zu den Feldspäten usw. Die Anwesenheit solcher loser gebundenen Kationen ist die Ursache, daß diese Strukturen zu unipolaren Ionenleitern bei tiefen Temperaturen führen. Schließlich kann man auch die Gläser mit unregelmäßigen, unperiodischen Strukturen dieser Art erklären, wie dies insbesondere WARREN (77) erfolgreich getan hat (s. o.).

Die dritte Hauptmodifikation der kristallisierten Kieselsäure ist der Tridymit. Auch er hat nach GIBBS (90) (1926) ein räumliches Netz-

gefüge (Abb. 45), aber mit starker Betonung einer hexagonalen Anordnung der  $\text{SiO}_4$ -Konfiguration. Die Verknüpfung dieser hexagonalen Schichten untereinander ist sehr innig. Zwischen Tridymit und Cristobalit besteht eine sehr nahe Verwandtschaft, die auf die Möglichkeiten besonders dichter Kugelpackung in reguläre oder hexagonale Strukturen geometrisch zurückzuführen ist. Das reguläre ZnS, die Zinkblende, wäre alsdann das Analogon zum Cristobalit, der hexagonale Wurtzit das Analogon zum Tridymit.

Schmilzt man den Quarz bei hohen Temperaturen, so geht er bekanntlich in das „Quarzglas“ über, das sich von ihm durch seine unperiodische Anordnung der  $\text{SiO}_4$ -Tetraeder nach ZACHARIASEN (78) und WARREN (77) unterscheidet. Die oben erwähnte vollkommene Sättigung der Ionenkräfte nach außen verändert sich nicht, daher sein ausgezeichnetes Isoliervermögen.

Eine Sonderstellung unter den Isolierstoffen nimmt die Gruppe der Titanverbindungen ein, besonders die mit Rutil aufgebauten. Das Gitter des Rutils ist nach VEGARD (91) relativ einfach (Abb. 46); es enthält in seinem tetragonalen Bau ionengebundene Gruppen O-Ti-O, ebenso wie die andere  $\text{TiO}_2$ -Modifikation, der Anatas (Abb. 47), aber in anderer Anordnung.

Wenn man dieses einfache und übersichtliche Gitter betrachtet, ist es verlockend, die Frage theoretisch aufzuwerfen, wie diese Struktur zu einer so merkwürdigen Höhe der Dielektrizitätskonstanten und einer so außerordentlichen Anisotropie führen kann. Die heutige Gittertheorie gibt darauf noch keine einfache Antwort, auch nicht auf die Frage, weshalb im Gegensatz zum Rutil der Anatas ein normales Verhalten mit niedriger DK aufweist. Allein unter der Annahme einer induzierten Verschiebung der Ionen im Gitter, also unter Auftreten induzierter Dipole ließe sich eine einleuchtende Veranschaulichung solcher Verschiedenheiten gewinnen; rechnerisch ist dieses Gebiet aber noch nicht zugänglich (vgl. auch S. 16f.).

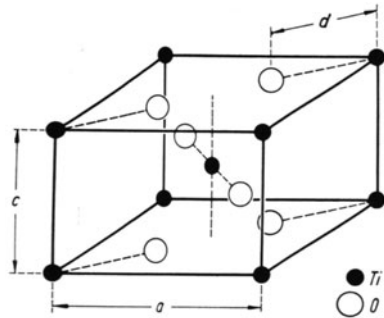


Abb. 46. Kristallgitter des Rutils.  
(Nach L. VEGARD.)

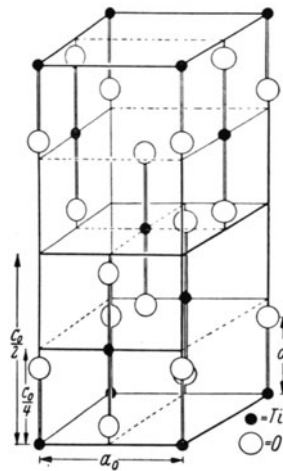


Abb. 47. Gitterstruktur von Anatas.  
(Nach L. VEGARD.)

### III. Aufbau und Zusammensetzung der technischen anorganischen Isolierstoffe.

#### 1. Heterogener Aufbau der keramischen Isolierstoffe für niedere Temperaturen.

Die technischen Isolierstoffe sind zum weitaus überwiegenden Teil nicht allein auf eine Kristallart aufgebaut, sondern heterogen, d. h. aus verschiedenen Phasen zusammengesetzt. Nur beim Glimmer könnte man von einkristallinem Isolierstoff sprechen, doch ist auch hier dieser Begriff mit Vorsicht zu gebrauchen, schon im Hinblick auf die Mischkristallbildung und die Einschlüsse. Erst recht gilt dies für die keramischen Isolierstoffe, die unter Umständen sogar sehr kompliziert zusammengesetzte, mehrphasige Gemenge darstellen.

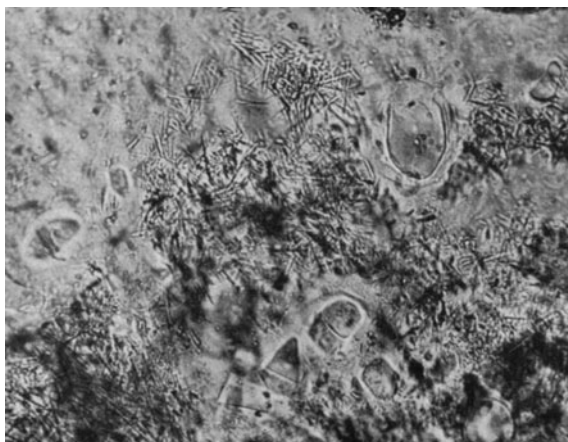


Abb. 48. Dünnschliffbild eines Hartporzellans. In der glasigen Grundmasse sind feinverteilte Nadeln von Mullit deutlich zu erkennen, ferner verrundete angeschmolzene Reste von Quarzkörnern, welche von einem kiesel-säurereichen Glase Hofartig umgeben sind.  
(Vergr. ca. 750mal.)

a) **Die Porzellane.** Porzellan ist ein keramisches Produkt, welches gewonnen wird beim Brennen eines Gemenges von Kaolin, Quarz und Feldspat.

Die Temperatur steigt bei diesem Vorgang so hoch an, daß die Feldspäte schmelzen und ein viskoses Glas liefern, in dem sich der Quarz zu lösen beginnt, und daß die Tonsubstanz sich zu Mullit und freier Kieselsäure umsetzt. Das Produkt zeigt also im Dünnschliff eine Glasphase, in der Quarzreste suspendiert sind, und welche zahlreiche Neubildungen von Mullit aufweist (Abb. 48). Röntgenographisch ist bei einer Pulveraufnahme die Bildung dieses Mullits deutlich zu erkennen, daneben machen sich auch die Linien des Quarzes bemerkbar, sowie gelegentlich

die des den höheren Temperaturen entsprechenden Cristobalits; die Feldspatlinien sind aber verschwunden. Durch das starke Auftreten glasiger Phasen ist das Röntgendiagramm infolge der diffusen Strahlung der isotropen Phase stark verschleiert. Es ist nicht leicht, aus einem solchen komplizierten Röntgenbild etwa Rückschlüsse auf die Menge der einzelnen Kristallphasen zu ziehen, da die Bestimmung der Intensitäten der Interferenzlinien durch mannigfaltige Koinzidenzen erschwert wird. Dennoch hat man durch photometrische Auswertung nach ZWETSCH (92) und BÜSSEM (93) im Prinzip die Möglichkeit eines derartigen Verfahrens bestätigen können. Nicht viel genauer ist das übliche Verfahren, die Anwesenheit des Mullits quantitativ durch Weglösen des Quarzes und des Glases in kalter, verdünnter Flußsäure zu bestimmen, wie dies ZÖLLNER (94) schon vordem angegeben hatte (bei diesem Autor wird noch von Sillimanit als Kristallart des Porzellans gesprochen, was in Mullit zu ändern ist).

Betrachtet man ein solches Mikrogefüge wie in Abb. 48 unter den Gesichtspunkten der dielektrischen Anforderungen an ein hochwertiges Isoliermaterial, so sind die Bestandteile im einzelnen sicher sehr günstig; das Grundglas enthält reichlich Kieselsäure und dürfte auch in seinem hohen Tonerdegehalt zu guten Isolatoren hinsichtlich seiner Ionenleitfähigkeit zu rechnen sein. Selbstverständlich hängt diese Eignung der Glasbasis auch stark von der Zusammensetzung der Ausgangsrohstoffe ab, ungünstig müßte es sich für das Zustandekommen eines Wärmedurchschlags auswirken, wenn ein natronreicher Feldspat (Albit) verwendet würde, da dieser größere Mengen der leicht beweglichen Na<sup>+</sup>-Ionen einführen würde. Kalifeldspat ist hier überlegen, doch ist es wohl unvermeidlich, daß in zahlreichen natürlichen Feldspaten Albit in Gestalt der bekannten Perthitspindeln eingewachsen ist. Der Hersteller des Porzellans tut also gut daran, die chemische Zusammensetzung wie die mineralogische Beschaffenheit seiner Rohstoffe genau zu prüfen.

Ungünstig ist die heterogene Struktur vom Standpunkt der dielektrischen Verluste; das gewöhnliche Porzellan ist mit seinem mannigfaltigen Aufbau aus Glasbasis, Quarzrelikten und Mullitausscheidungen nicht ideal homogen, sein dielektrischer Verlust ist relativ hoch. Man wird also danach streben, das Porzellan für die Zwecke hochfrequenter Beanspruchung nach Gefüge und Mineralbestand zu verbessern.

**b) Speckstein-(Steatit)-Gruppe.** Ein Weg zur Gewinnung andersartiger Isolierstoffe ist die Verarbeitung des natürlichen Specksteins, oder wie er als Mineralname in der Wissenschaft gebraucht wird, des Steatits, zu keramischen Formkörpern.

Der Speckstein ist eine besonders dichte Spielart des Minerals Talk, welches aus Magnesiumhydrosilikat besteht. Beim Brennen des Talks wird wie von der Kaolinsubstanz Wasser abgespalten, und es hinter-

bleibt ein Magnesiumsilikat-Kieselsäuregemenge der Zusammensetzung  $3\text{MgO} + 4\text{SiO}_2$ . Dieses bildet bei der Umkristallisation ein neues Mineral,

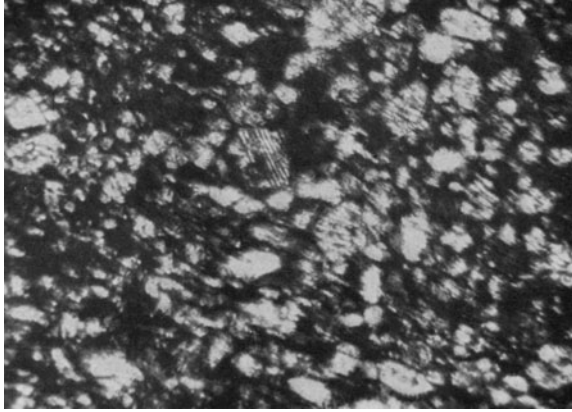


Abb. 49. Kristalle von Klinoenstatit in gebranntem Speckstein. (Nik. gekreuzt; Vergr. 530mal.) Die polysynthetische Verzwilligung ist deutlich zu erkennen.

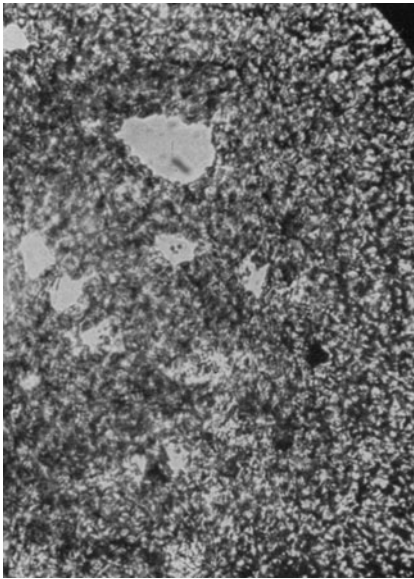


Abb. 50. Dichtes körniges Gefüge einer technischen Steatitmasse. (Vergr. 530mal.)

welches der Pyroxengruppe (mit kettenförmiger Anordnung der  $\text{SiO}_4$ -Tetraeder) zugehört und die Zusammensetzung  $\text{MgO} \cdot \text{SiO}_2$  hat (mineralogisch als Klinoenstatit bezeichnet). Neben dem Klinoenstatit enthält der gebrannte Speckstein noch freie Kieselsäure, die man als Glasgrundmasse im Dünnschliff erkennen kann (Abb. 49). Röntgenographisch erweist sie sich bereits als cristobalithaltig, daher die charakteristischen Linien im Pulverdiagramm. Das Gefüge eines solchen Specksteinkörpers ist elektrisch wesentlich günstiger als das des gewöhnlichen Porzellans, da es vor allem nur noch zwei Hauptphasen (Klinoenstatit und Glas) im Aufbau zeigt, und

auch nicht so viel Alkalien eingeführt werden als beim Porzellan mit seiner feldspathaltigen Rohmasse.

Praktisch ist die Gestaltung von Steatiten besonders im Hinblick auf ihre vorzüglichen mechanischen Festigkeitseigenschaften sehr mannigfaltig. Die fast kaolinfreien Specksteinmassen mit ihrer geringen Glasbasis neben Klinoenstatit sind für Hochfrequenz-Isolation auch dem Porzellan überlegen (Abb. 50 bis 52), da sie wesentlich geringere dielektrische Verluste verursachen [vgl. SOYCK (95) 1936].

c) **Rutilgruppe.** Einen besonders interessanten Isolierstoff gewinnt man, wenn man als kennzeichnende Kristallart das Titanoxyd in der Modifikation des Rutilis wählt. Von diesem weitverbreiteten Mineral war schon lange durch die Messungen von W. SCHMIDT (96) (1902) bekannt, daß es eine außerordentliche Anisotropie der Dielektrizitätskonstanten, analog zu seiner enormen Doppelbrechung, zeigt. Die Werte der DK

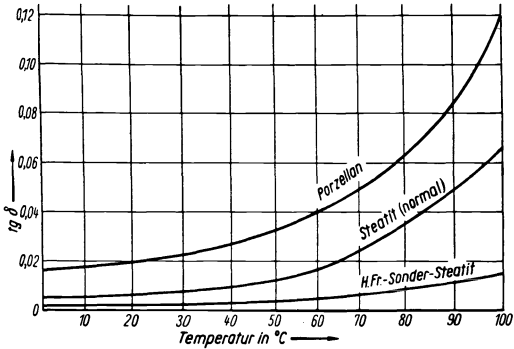


Abb. 51. Temperaturverhalten des Verlustfaktors keramischer Isolierstoffe bei 50 Hz. (Nach W. SOYCK.)

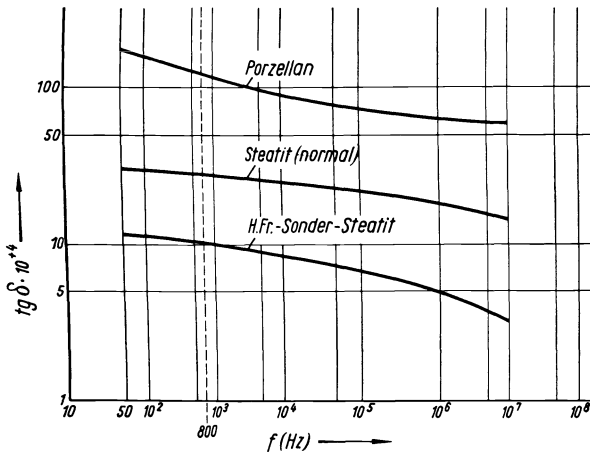


Abb. 52. Frequenzgang des Verlustfaktors keramischer Isolierstoffe. (Nach W. SOYCK.)

parallel und senkrecht zur Hauptachse des tetragonalen Rutilis sind  $\epsilon = 175$  bzw.  $\epsilon = 89$ , also beide außergewöhnlich hoch. Der Gedanke, Kondensatoren mit Benutzung von Rutil zu bauen [vgl. SOYCK (97)] ist nicht neu; die Schwierigkeiten der Herstellung solcher Isolatoren aus Rutil liegen vielmehr ganz auf dem keramischen Fertigungsgebiet,

da das reine Titanoxyd ein außerordentlich wenig plastischer Körper ist. Man muß also notgedrungen Plastizierungsmittel zusetzen, die dann die

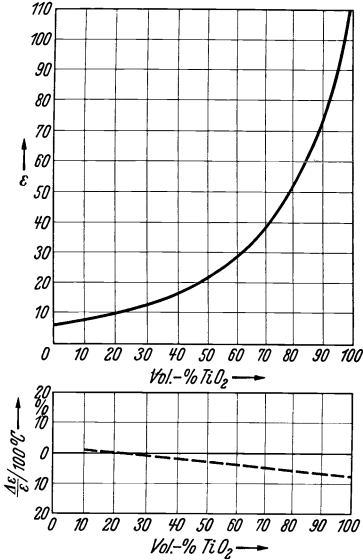


Abb. 53. Dielektrizitätskonstante ( $\epsilon$ ) und deren Abhängigkeit von der Temperatur ( $\Delta \epsilon / \epsilon$  je  $100^\circ \text{C}$  für rutilhaltige, keramische Stoffe ( $20\text{--}200^\circ \text{C}$ ). (Nach W. SOYCK.)

Homogenität des Produktes stören. Im Wechselfeld bedeutet dies naturgemäß im Hinblick auf den dielektrischen Verlust einen erheblichen Nachteil, zumal auch dann die Spannungsverteilung bei dem jedenfalls großen Unterschied der Dielektrizitätskonstanten der nebeneinander liegenden Phasen ungünstig ist. Man muß also die Menge der Bindemittel (z. B. hochplastischen Ton) möglichst niedrig bemessen, um die DK nicht zu sehr zu senken.

Andererseits kann man durch planmäßige Änderung der Zusätze die dielektrischen Eigenschaften der Produkte weitgehend abstimmen, also von den hohen DK-Werten des Rutil bis zu den kleinen der gewöhnlichen keramischen Massen. Dazu kommt noch die Eigenart des Rutil zuzustatten, daß er im Gegensatz zu fast allen anderen keramischen Stoffen einen negativen Temperaturkoeffizienten der DK hat

(Abb. 53). Durch Abstimmung mit anderen Bestandteilen kann man

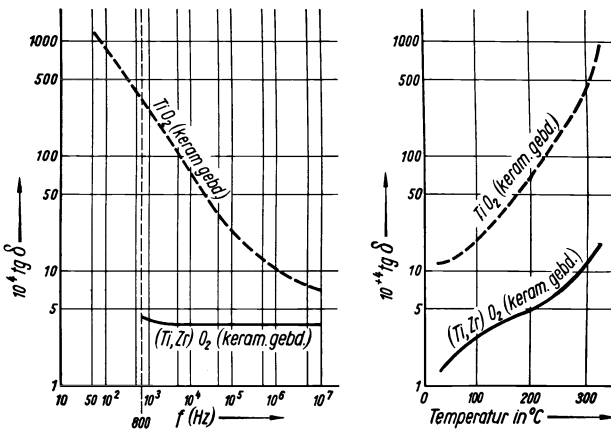


Abb. 54. Frequenz und Temperaturverhalten von Stoffen hoher Dielektrizitätskonstante. (Nach W. SOYCK.)



also Massen entwickeln, die praktisch keinen Temperaturgang der DK haben; die mit ihnen gebauten Kondensatoren sind temperaturunempfindlich [vgl. HANDREK (98)].

Der Rutil verhält sich gegen basische Oxyde etwa wie die Kieselsäure; er vermag also auch Verbindungen, Salze der Titansäure zu bilden. Unter diesen interessieren wieder besonders die Magnesiumtitanate, aus welchen man mit besonderer Homogenität der Struktur Spezialmassen für die Hochfrequenztechnik mit extrem kleinen Werten des dielektrischen Verlustes gewonnen hat [ALBERS-SCHÖNBERG, SOYCK und UNGEWISS (99)]. Diese Homogenität ist besonders auffallend an der Durchsichtigkeit derartiger Massen zu erkennen. Zuletzt ist der Rutil auch zur Bildung von Mischkristallen mit anderen Dioxiden befähigt, so z. B. mit Zinndioxyd und Zirkondioxyd [SCHUSTERIUS, BÜSSEM, RIEKE und UNGEWISS (99) 1936]. (Abb. 54). Auf röntgenographischem Wege läßt sich die Bildung solcher homogener Mischphasen ausgezeichnet verfolgen, besonders an Hand der Linienverschiebungen im Pulverdiagramm, die auf stetige Änderungen der Gitterkonstanten hinweisen. Technisch haben Massen mit  $ZrO_2$  schon Verwendung gefunden, sie sind zweifellos als Weiterentwicklung der Grundanschauungen über die Hochfrequenz-Isolierstoffe recht bedeutsam (SCHUSTERIUS).

## 2. Aufbau von Isolierstoffen für Elektrowärmezwecke.

Eine besonders eigenartige Aufgabe bietet sich in der heutigen Elektrowärmeindustrie, welche Isolierstoffe erfordert, die auch bei hohen Temperaturen möglichst befriedigend sich verhalten. Es muß allgemein für solche Stoffe vom elektrischen Standpunkt aus gefordert

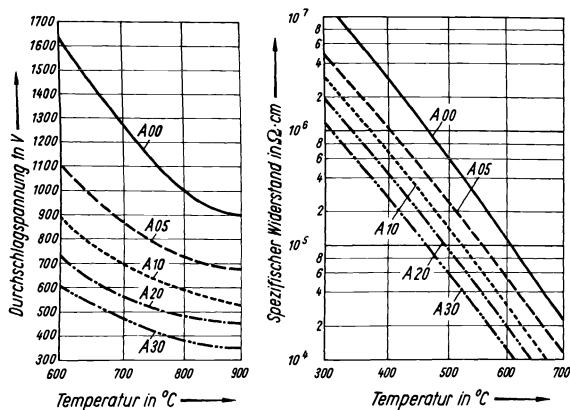


Abb. 55. Durchschlagsspannung und spezifischer Durchgangswiderstand von Massen und Kalifeldspat. Die Zahlen in der Bezeichnung der Massen geben den Gehalt an Feldspat wieder. (Nach C. SCHUSTERIUS.)

werden, daß sie ein geringes Ionenleitvermögen bei höheren Wärmegraden zeigen sollen, also relativ arm an leichtbeweglichen Alkaliionen sein müssen, und daß sie sich auch sicher gegen Wärmedurchschlag verhalten.

a) **Porzellangruppe.** Das Gefüge der Porzellane, welches bei Beanspruchung im Hochfrequenzfeld durch seine Heterogenität ungünstig wirkte, ist auch der Verwendung des gewöhnlichen Porzellans bei den meisten Zwecken der Elektrowärme hinderlich. Die Glasbasis erweicht bereits bei Temperaturen um  $700\text{--}800^\circ$ , und das Ionenleitvermögen ist schon bei wesentlich tieferen Temperaturen recht merklich. Je höher der Feldspatgehalt der Rohmasse, desto höher ist das Leitvermögen des Scherbens (Abb. 55). Selbst das beste Hartporzellan zeigt diesen Typus des Wärmeverhaltens; dazu kommt noch die Empfindlichkeit des Porzellans gegen Temperaturwechsel infolge seiner relativ großen Wärmeausdehnung. Das Verhalten des Porzellans beim Wärmedurchschlagsversuch ist durch den Gehalt an Alkalien bestimmt. Je höher der

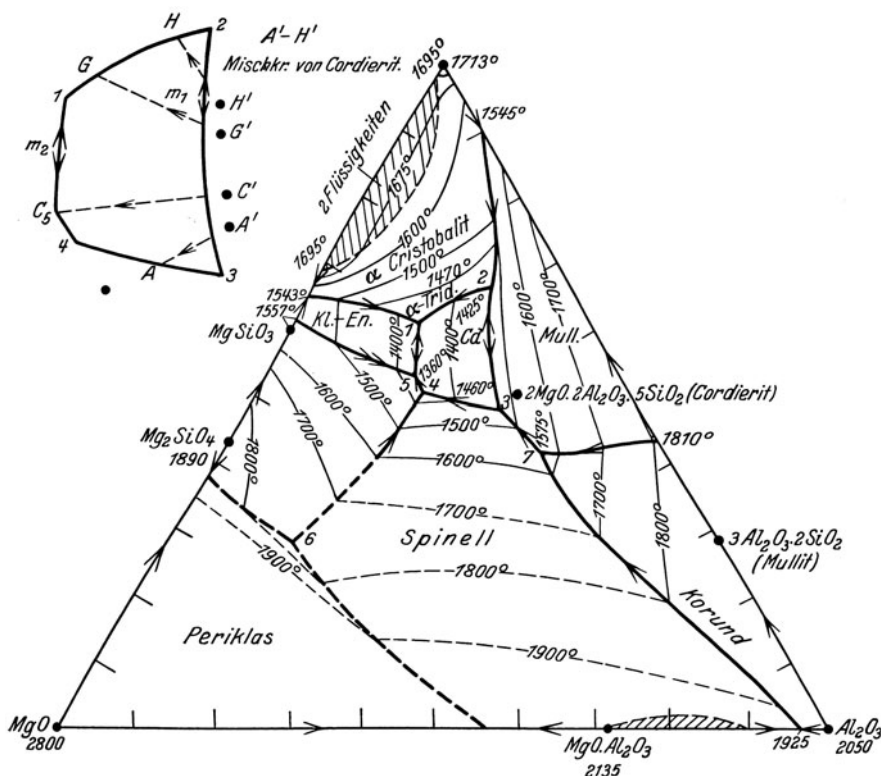


Abb. 56. System  $\text{MgO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_3$ . (Nach G. A. RANKIN und H. E. MERWIN.)

Feldspatgehalt der Rohmasse, desto niedriger liegt die Durchschlags-  
spannung [vgl. SCHUSTERIUS (46, 101) 1934].

Günstiger als die eigentlichen Porzellane sind Massen, die aus ton-  
erdereichereren keramischen Gemengen hergestellt werden, wie z. B. die  
altbekannte MARQUARDTSCHE Masse, welche in ihrer Zusammen-  
setzung etwa der des Mullits entspricht. Das Kristallgefüge einer solchen  
Masse ist durch die innige Verfilzung der feinen Mullitnadelchen gekenn-  
zeichnet, die Glasbasis ist auf ein Minimum beschränkt. Die vorzüg-  
lichen Isolationseigenschaften der MARQUARDTSCHE Masse machen sie  
speziell beim Bau von Widerstandsöfen sehr geeignet, bis zu Tempera-  
turen von etwa 1500° ist ihr Ionenleitvermögen noch relativ gering.  
Trotzdem ist sie gegen Wärmedurchschlag nicht unempfindlich, und be-  
sonders ist sie nicht temperaturwechselbeständig. Für größere Öfen ist  
die Beschaffung der Isolationsstoffe aus MARQUARDTSCHE Masse wohl  
nicht durchführbar; basische Chamotten und sog. Sillimanitsteine er-  
füllen bis zu Temperaturen von 1200—1400° annähernd den gleichen  
Zweck. Durch die Verunreinigungen der Chamottetone aber ist natur-  
gemäß ihr elektrisches Verhalten stark beeinflusst.

**b) Tonsubstanz-Speckstein-Massen.** Einen wesentlichen Fortschritt  
gegenüber den reinen Porzellanmassen bedeutet auf dem Elektrowärme-

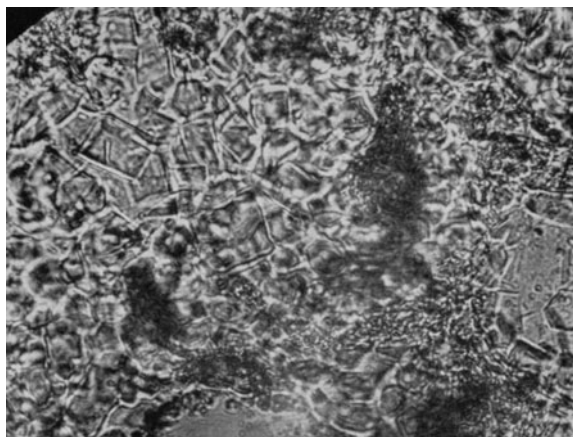


Abb. 57. Wohlausgebildeter Cordierit in einer Ton- und  
Specksteinmasse. (Vergr. 530mal.)

gebiet die Einführung von Magnesiumsilikaten. Bringt man Magnesia,  
Tonerde und Kieselsäure, etwa aus Gemengen von Ton und Talk beim  
keramischen Brande zur Reaktion, so bildet sich verhältnismäßig leicht  
eine ternäre Verbindung dieser drei Oxyde von dem komplizierten Bau  
 $2\text{MgO} \cdot 2\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{SiO}_2$ , die als Mineral unter dem Namen Cordierit be-

kannt ist (Abb. 56 und 57). Diese Kristallart zeichnet sich dadurch aus, daß sie in solchen Massen eine extrem kleine Wärmeausdehnung verursacht [vgl. O. KRAUSE und E. JÄKEL (100) 1934], so daß man mit cordierit-haltigen Isolierstoffen bei den vorhandenen minimalen mechanischen Verspannungen die eine Forderung der Elektrowärmeindustrie, die hohe Temperaturwechselbeständigkeit, sicher erreichen kann. Auch das elektrische Isoliervermögen der Cordieritmassen ist sehr befriedigend, sofern man nicht größere Mengen Alkalien mit Feldspatzusätzen einführt. Das gleiche gilt für den Wärmedurchschlag, wie dies sehr anschaulich im Vergleich zu einigen anderen Massen die Abb. 58 nach ALBERS-SCHÖNBERG und SCHUSTERIUS (101) zeigt. Die zum überwiegenden Anteil aus Speckstein bestehenden reinen Steatitmassen eignen sich, wie die Abbildung erkennen läßt, gleichfalls vorzüglich für die Isolation in der Hitze. Infolge der hohen Wärmedehnung werden diese Werkstoffe jedoch zur Herstellung größerer Elektrowärmeteile nicht oder nur selten benutzt. Eine um so größere Rolle spielen sie für die Herstellung von Kleinteilen, insbesondere Isolierperlen.

c) **Sinterkorundmassen.** Noch auf andere Weise kann man ausgezeichnete elektrische Isolierstoffe für hohe Temperaturen gewinnen, nämlich

bei Anwendung des kristallisierten Korunds. Die Gewinnung solcher Massen durch keramisches Brennen bei sehr hohen Temperaturen hat Ähnlichkeit mit der Rekristallisation von Metallen beim Glühen der feinen Pulver; es kommt zur Ausbildung vollkristalliner Produkte, welche durch das Fehlen alkaliner Verunreinigungen ein ganz vorzügliches Isoliervermögen auch bei hohen Wärmegraden sicherstellen. Speziell für die Zwecke der Zündkerzenherstellung sind solche Isoliermassen sehr willkommen, haben sie doch auch sehr gute Temperaturwechselbeständigkeit durch ihr großes Wärmeleitvermögen (102).

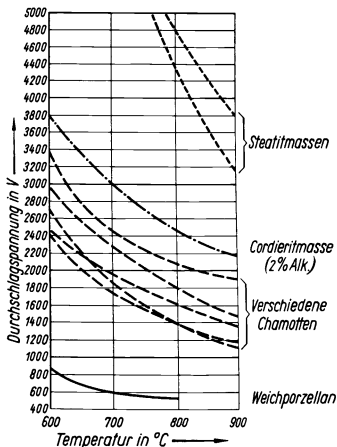


Abb. 58. Durchschlagspannung praktischer verwendeter Elektrowärmemassen. (Nach E. ALBERS-SCHÖNBERG u. C. SCHUSTERIUS.)

### 3. Das Glas als elektrischer Isolierstoff.

Man könnte sich fragen, weshalb gerade der am besten theoretisch untersuchte silikatische Isolierstoff, das Glas, praktisch so außerordentlich wenig angewendet wird. Die Gründe dafür liegen auf der Hand: in erster Linie sind es die Eigenschaften der alkalihaltigen, besonders der Natron-Kalksilikatgläser, welche am ungünstigsten für die Ver-

wendung zu Isolierzwecken erscheinen. Das Ionenleitvermögen ist bei diesen Typen bereits sehr merklich, sowie die Temperatur ansteigt. Bei niedrigen Temperaturen ist das Glas relativ empfindlich gegen die Atmosphärlinien; neben seiner chemischen Angreifbarkeit durch oberflächliche Hydrolyse ist es die Ausbildung der gefürchteten Wasserhäute, welche das Glas minderwertig für Isolationszwecke, besonders bei Hochspannung erscheinen läßt.

Es hat nicht an Versuchen gefehlt, die auffallend ungünstigen Eigenschaften zu verbessern. Das Glas bietet für solche Bemühungen auch tatsächlich ein fruchtbares Feld, können wir doch durch systematische Abänderung seiner Zusammensetzung weitgehend seine hydrolytischen und elektrischen Eigenschaften variieren. Wir verdanken auf diesem Gebiet vor allem GEHLHOFF und THOMAS (103),

alsdann auch FULDA (23) eine Übersicht über die spezifischen Wirkungen bestimmter glasbildender Oxyde, welche in das Glas eingeführt werden können (Abb. 59 und 60). Vor allem lehren diese Darstellungen, daß die Bildung einer oberflächlichen Wasserhaut mit ihren so unangenehmen Begleiterscheinungen der hydro-

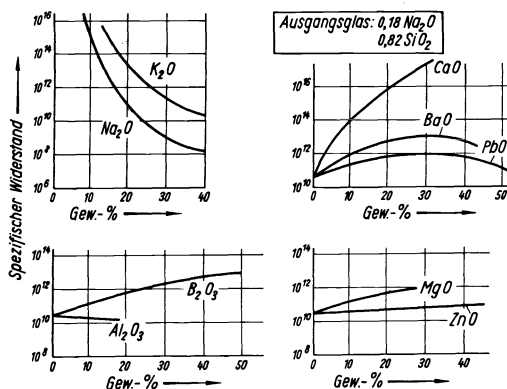


Abb. 59. Wirkung des Ersatzes von  $SiO_2$  durch verschiedene Oxyde auf das Körperleitvermögen von Glas. (Nach E. FULDA.)

lytischen Glaszersetzung mit Herabsetzung des Alkaligehaltes bedeutend gemäßigt werden kann. Vor allem das Natron wirkt im Glase in diesem Sinne ungünstig, gehen wir also im Na-Gehalt des Glases zurück, so verbessern wir (s. o.) gleichzeitig die Beständigkeit des Glases und seinen elektrischen Körperwiderstand. Günstig auf die Isoliereigenschaften des Glases wirkt ein Zurückdrängen der Alkalien, die Einführung von Tonerde und vor allem von Borsäure. Alkaliarme, kieselsäurereiche Bor-silikatgläser, wie sie in der amerikanischen Pyrextype technisch entwickelt wurden, erfüllen die Anforderungen an die Isolierstoffe der Elektrotechnik durchaus befriedigend. Der Anwendung solcher Gläser als Nieder- und Wechsellspannungsisolatoren könnte nichts mehr im Wege stehen [s. dazu F. SPÄTE (104) 1932]. Tatsächlich ist auch in den Vereinigten Staaten und einigen europäischen Ländern die Anwendung von Glasisolatoren der genannten Art recht verbreitet. Die Hauptbedenken gegen Verwendung von Glas liegen heute eher auf dem Gebiet seiner geringen Temperaturwechselbeständigkeit.

In gleicher Weise wie man die Gläser in Richtung auf geringe Oberflächen- und Körperleitfähigkeit systematisch entwickeln kann, ist auch die Dielektrizitätskonstante in gewissen Grenzen regelbar. Man kann z. B. durch die gleichen Methoden wie bei GEHLHOFF und THOMAS den Einfluß einzelner glasbildender Oxyde auf die Höhe der DK oder des dielektrischen Verlustes untersuchen, wie dies KELLER und EGAMI (32) getan hat. In ähnlicher Richtung hatte schon E. SCHOTT (31) eine große Zahl der Jenaer Gläser auf die dielektrischen Verluste geprüft. Für den Bau von Kondensatoren ist also das Glas durchaus brauchbar, obwohl es bei dem heutigen Stand der keramischen Isolierstoffe vom Rutiltypus in vielem überholt sein dürfte. Günstig ist immerhin bei solchen Gläsern die geringe Höhe der dielektrischen Verluste. Die Anforderungen an die Homogenität machen beim Glase allerdings auch eine besonders strenge Berücksichtigung der Schlierenbildung erforderlich. Ein schlierenhaltiges Glas zeigt sogleich erhöhte dielektrische Verluste.

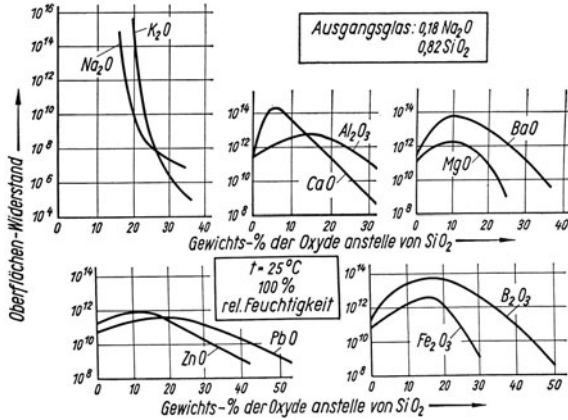


Abb. 60. Einfluß des Ersatzes von SiO<sub>2</sub> durch verschiedene Oxyde auf die Oberflächenleitfähigkeit. (Relative Messungen.) (Nach E. FULDA.)

Das idealste Glas ist und bleibt das Kieselglas, freilich auch der teuerste Isolierstoff. Seine praktische Anwendung ist leider damit begrenzt, so vorzüglich es in fast allen Anforderungen der heutigen Elektrotechnik sich verhält. Kleine Dielektrizitätskonstante bei minimalen Verlusten, kleinster Wärmeausdehnungskoeffizient und hohe Temperatur-Wechselbeständigkeit vereinen sich in ihm. Daher ist seine Anwendung in allgemeinerem Sinne ein Hochziel elektrischer Isolier-technik. Das durchscheinende Kieselglas, welches durch Sintern mit zahlreichen Luftkanälen durchzogen ist, kann als eine vermittelnde Lösung des Problems angesehen werden, die in vielen Fällen zur Anwendung von Hochspannungsisolatoren aus solchem Material, z. B. für Entstaubungsanlagen, geführt hat [vgl. SKAUPY, SINGER (105)].

**Schrifttum.**

1. Die älteste Literatur über das Ionenleitvermögen ist zusammengestellt bei R. LORENZ: Elektrolyse geschmolzener Salze Bd. I (1905) S. 190; Bd. II S. 229.
2. WARBURG, E.: Wied. Ann. Physik Bd. 21 (1884) S. 622.
3. WARBURG, E. u. F. TEGETMEIER: Wied. Ann. Physik Bd. 32 (1887), S. 447; Bd. 35 (1888) S. 455.
4. BECKENKAMP, J.: Z. Kristallogr. Bd. 15 (1889) S. 511.
5. CURLE, J. s. bei R. B. SOSMAN: The properties of silica (1927) S. 551ff.; ferner Lumière électr Bd. 28 (1888) S. 221, 255, 318.
6. TEGETMEIER, F.: Ann. Physik Bd. 41 (1890) S. 18.
7. Dissertation von F. KOPFERMANN, Münster 1908; Ann. Physik (4) Bd. 32 (1909) S. 739.
8. RASCH, E. u. F. HINRICHSSEN: Z. Elektrochem. Bd. 14 (1908) S. 41.
9. MCDOWELL, L. S. u. H. L. BEGEMAN: Physic. Rev. Bd. 31 (1928) S. 476.
10. LITTLETON, J. T.: Ind. Engng. Chem. Bd. 25 (1933) S. 748; "The electrical properties of glass" (1933) S. 84ff.
11. WOLAROWITSCH, M. P. u. D. M. TOSTOJ: J. Soc. Glass Technol. Bd. 20 (1936) S. 54—60; s. a. C. L. BABCOCK: J. Amer. ceram. Soc. Bd. 17 (1934) S. 329.
12. SCHÖNBORN, H.: Z. Physik Bd. 22 (1924) S. 305.
13. HÄNLEIN, W. u. M. THOMAS: Glastechn. Ber. Bd. 12 (1934) S. 109.
14. LILLE, H. R.: J. Amer. ceram. Soc. Bd. 16 (1933) S. 619.
15. SEDDON, E., E. J. TIPPETT u. W. E. S. TURNER: J. Soc. Glass Technol. Bd. 16 (1932) bes. S. 467f.
16. FULCHER, G. S.: J. Amer. ceram. Soc. Bd. 8 (1925) S. 399, 789.
17. TAMMANN, G. u. W. HESSE: Z. anorg. allg. Chem. Bd. 156 (1926) S. 254ff.
18. POOLE, H.: Philos. Mag. 42 (1921) S. 488; Nature, Lond. Bd. 107 (1921) S. 584.
19. QUITTNER, F.: Sitzgsber. Akad. Wiss. Wien, Math.-naturwiss. Kl. 135, II A (1927) S. 151, 173.
20. PIRANI, M. u. E. LAX: Z. techn. Physik Bd. 3 (1922) S. 232.
21. SELENYI, P.: Chem. Rundsch. 1927 Nr. 19 S. 162.
22. YAGER, W. A. u. S. O. MORGAN: J. physic. Chem. Bd. 35 (1931) S. 2040.
23. FULDA, M.: Sprechsaal Keramik usw. Bd. 60 (1927) S. 769, 789, 810, 831, 853.
24. LITTLETON, J. T. u. G. W. MOREY: The electrical properties of glass (1933) S. 76ff.; s. a. G. W. MOREY: J. Franklin Inst. (1935) S. 315.
25. CURTIS, H. L.: Bull. Bur. Stand. Bd. 11 (1914/15) S. 359.
26. BUSH, V. u. L. H. CONNELL: J. Franklin Inst. Bd. 194 (1922) S. 231.
27. BRONSON, H. L. bei A. W. HULL: Physics Bd. 2 (1932) S. 420.
28. GUYER, E. M.: J. Amer. ceram. Soc. Bd. 16 (1933) S. 607.
29. ROGOWSKI, W.: Naturwiss. Bd. 16 (1928) S. 162—169, bes. Abb. 8.
30. HOPKINSON, J.: Philos. Trans. Roy. Soc., Lond. Bd. 166 (1876) S. 489; Bd. 167 (1877) S. 599; Proc. Roy. Soc., Lond. Bd. 25 A (1876) S. 496; s. bes. bei J. B. WHITEHEAD: "Lectures on dielectric theory and insulation" New York 1927.
31. SCHOTT, E.: Z. Hochfrequenztechn. Bd. 18 (1921) S. 82—122; Diss. Jena 1923.
32. KELLER, F.: Z. techn. Physik Bd. 13 (1932) S. 237; EGAMI, K.: Journ. ceram. Soc. Japan. Bd. 42 (1934) S. 619.
33. STRUTT, M. J. O.: Arch. Elektrotechn. Bd. 25 (1931) S. 715.
34. ADDENBROKE, G. L.: Philos. Mag. Bd. 45 (1923) S. 516; für Quarz s. die Messungen von R. JÄGER: „Die Dielektrizitätskonstante fester Körper bei verschiedenen Wellenlängen“ Diss. Berlin 1917.

35. WAGNER, K. W.: „Theoretische Grundlagen“. I. Kapitel i. d. Buche H. SCHE-  
RING: „Die Isolierstoffe der Elektrotechnik“ Berlin 1924, bes. S. 4—33.
36. MAXWELL, J. CL.: „Lehrb. d. Elektriz. u. d. Magnet.“ Bd. I, Berlin 1883,  
S. 328 ff.
37. ADDENBROKE, G. L.: Nature, Lond. Bd. 113 (1924) S. 490f.
38. McDOWELL, L. S. u. H. L. BEGEMAN: Physic. Rev. Bd. 33 (1929) S. 55.
39. HOPKINSON, J. s. bei LITTLETON u. MOREY: The electrical properties of glass  
(1933) S. 135.
40. DEBYE, P.: „Polare Moleküle“, Leipzig 1929; s. a. Kapitel II in A. GEMANT:  
Elektrophysik der Isolierstoffe, Berlin 1930, S. 25—57; ferner P. DEBYE:  
Physik. Z. Bd. 35 (1934) S. 101; Trans. Faraday Soc. Bd. 30 (1934) S. 679.
41. ERRERA, J.: J. Physique Chim. Bd. 5 (1924) S. 304; J. GRANIER: C. R. Acad.  
Sci., Paris Bd. 179 (1924) S. 1313.
42. DRUDE, P.: Ann. Physik Bd. 58 (1896) S. 1; Bd. 60 (1897) S. 500; Bd. 61  
(1897) S. 406; Bd. 64 (1898) S. 131.
43. ROGOWSKI, W.: Arch. Elektrotechn. Bd. 18 (1927) S. 123.
44. WAGNER, K. W.: Sitzgsber. Akad. Wiss. Berl. Bd. 29 (1922) S. 438; s. a. V. FOCK:  
Arch. Elektrotechn. Bd. 19 (1927) S. 71.
45. SEMENOFF, N. u. A. WALTHER: „Die physikal. Grundlagen der elektrischen  
Festigkeitslehre“ Berlin 1928; s. a. M. PIRANI u. H. SCHÖNBORN: Z. techn.  
Physik Bd. 6 (1925) S. 351—354.
46. SCHUSTERIUS, C.: Elektrowärme Bd. 4 (1934) S. 38.
47. MÜNDEL, E.: Arch. Elektrotechn. Bd. 15 (1925) S. 320.
48. ROCHOW, H.: Arch. Elektrotechn. Bd. 14 (1925) S. 361.
49. MARX, E.: Elektrotechn. Z. Bd. 50 (1929) S. 41.
50. INGE, LIDIA u. A. WALTHER: Z. Physik Bd. 34 (1925) S. 15; Bd. 37 (1926)  
S. 292; dies. m. N. SEMENOFF: a. a. O. Bd. 32 (1925) S. 273; Arch. Elektro-  
techn. Bd. 17 (1926) S. 433; s. a. das Buch (45).
51. ROGOWSKI, W., E. FLEGLER u. R. TAMM: Arch. Elektrotechn. Bd. 18 (1927)  
S. 479; s. a. (29) Abb. 16.
52. VON HIPPEL, A.: „Der elektrische Durchschlag in Gasen und festen Isolatoren“,  
Erg. exakt. Naturwiss. Bd. 14 (1935), bes. S. 104—127; dort auch Lit. d. zahlr.  
Arbeiten von A. v. HIPPEL c. s.
53. JOFFE, A. F.: „The physics of crystals“, New York 1928, bes. S. 162—174.
54. STASIW, O.: Nachr. Gött. Ges. Wiss. Math.-phys. Kl. 1933, Nr. 50; 1935 Nr. 12.
55. STEINMETZ, H.: Zbl. Mineral., Geol., Paläont. (1932) S. 139.
56. SIMPSON, G. C.: Proc. Roy. Soc., Lond. Bd. 111 (1926) S. 56; Nature, Lond.  
Bd. 124 (1929) S. 801, s. a. VON HIPPEL (52) S. 89—102.
57. BRAGG, W. L.: Z. anorg. allg. Chem. Bd. 90 (1915) S. 185.
58. BORN, M.: „Dynamik d. Kristallgitter“, Leipzig u. Berlin 1915; M. BORN u.  
A. LANDE: Ber. Berl. Akad. Wiss. (1918) S. 1048; Verh. dtsh. physik. Ges.  
Bd. 20 (1918) S. 210; s. a. Lit. bei G. HECKMANN: „Die Gittertheorie der festen  
Körper“, Erg. exakt. Naturwiss. Bd. 4 (1925) S. 146—152.
59. PAULING, L. u. M. L. HUGGINS: Z. Krist. Bd. 87 (1934) S. 205; J. Amer. chem.  
Soc. Bd. 49 (1927) S. 765.
60. GOLDSCHMIDT, V. M.: „Geochemische Verteilungsgesetze“, Norske Ved. Selsk.  
Skrift. Oslo, Math.-Naturw. Kl. 1923—1926, I—VIII; zusammengefaßt im  
Artikel „Kristallchemie“ im Handwörterbuch der Naturwissenschaften. 2. Auf-  
lage. Bd. V. Jena 1934.
61. BRAGG, W. L.: „The Structure of Silicates“, Leipzig 1930; Z. Krist. Bd. 74  
(1930) S. 237.



62. KEESOM, W. H. u. K. W. TACONIS: *Physica* Bd. 3 (1936) S. 237.
63. LEWIS, G. N.: „Die Valenz und der Bau der Atome und Moleküle“, deutsch von G. WAGNER u. H. WOLFF, Braunschweig 1927.
64. FAJANS, K.: *Sci. et Ind.* Bd. 62 (1930) S. 107; s. a. A. E. VAN ARKEL u. J. H. DE BOER: „Chemische Bindung als elektrostatische Erscheinung“, Leipzig 1931, S. 276ff.
65. BRAGG, W. H. u. W. L.: *Proc. Roy. Soc., Lond.* Bd. 89 (1913) S. 277; *Z. anorg. allg. Chem.* Bd. 90 (1914) S. 219.
66. HASSEL, O. u. H. MARK: *Z. Physik* Bd. 25 (1924) S. 317.
67. HELMHOLTZ, L.: *Z. Krist.* Bd. 95 (1936) S. 129.
68. EUCKEN, A. u. A. BÜCHNER: *Z. physik. Chem. Abt. B*, Bd. 27 (1934) S. 321.
69. RUBENS, H.: *Ber. Berl. Akad. Wiss.* (1915) S. 4; TH. LIEBISCH u. H. RUBENS: desgl. (1919) S. 876; (1921) S. 211.
70. JOFFÉ, A. F.: „The Physics of Crystals“, New York 1928, S. 168.
71. SMEKAL, A.: Zahlreiche Abhandlungen in *Z. physik. Chem. Abt. B u. Z. Physik* usw.; zusammengefaßt z. B. in den Vorträgen *Z. angew. Chem.* Bd. 42 (1929) S. 489; *Glastechn. Ber.* Bd. 7 (1929) S. 265; Art. „Kohäsion der Festkörper“ im Handbuch d. Physik u. Techn. Mechanik, Bd. IV, 2 (1931) S. 1. S. a. die reichhaltige Behandlung und Diskussion des Gegenstandes „Ideal- und Realkristall“ in d. *Z. Kristallogr.* Bd. 89 (1934) Sonderh. 3/4, S. 193; Bd. 93 (1936) S. 161.
72. STROCK, L. W.: *Z. Kristallogr.* Bd. 93 (1936) S. 285.
73. BERGER, E.: *Glastechn. Ber.* Bd. 5 (1927), bes. S. 398.
74. RANDALL, J. T.: Zusammengefaßt in dem Buche „The diffraction of X-rays and electrons in amorphous solids, liquids and gases“, New York 1934, S. 175; J. T. RANDALL, H. P. ROOKSBY u. B. S. COOPER: *Z. Kristallogr.* Bd. 75 (1930) S. 196; *J. Soc. Glass Technol.* Bd. 14 (1930) S. 219; Bd. 17 (1933) S. 287.
75. SCHERRER, P.: *Nachr. Ges. Wiss. Göttingen* (1918) S. 98.
76. VALENKOV, N. u. E. PORAY-KOSHITZ: *Z. Kristallogr.* Bd. 95 (1936) S. 195.
77. WARREN, B. E.: *Z. Kristallogr.* Bd. 86 (1933) S. 349; *Physic. Rev.* Bd. 45 (1934) S. 657; *J. Amer. ceram. Soc.* Bd. 17 (1934) S. 249.
78. ZACHARIASEN, W. H.: *J. Amer. chem. Soc.* Bd. 54 (1932) S. 3841; *Glastechn. Ber.* Bd. 11 (1933) S. 120; *J. chem. Phys.* Bd. 3 (1935) S. 162.
79. Vgl. F. PANETH, K. PETERS u. P. GÜNTHER: *Ber. dtsh. chem. Ges.* Bd. 60 (1927) S. 808, 809; G. A. WILLIAMS u. J. B. FERGUSON: *J. Amer. chem. Soc.* Bd. 44 (1922) S. 2160; Bd. 46 (1924) S. 635.
80. TAYLOR, W. H.: *Z. Kristallogr.* Bd. 68 (1928) S. 503 (Sillimanit u. Mullit); *Trans. ceram. Soc.* Bd. 32 (1933) S. 7 (Mullit); ST. NÁRAY-SZABÓ, W. H. TAYLOR u. W. W. JACKSON: *Z. Kristallogr.* Bd. 71 (1929) S. 117 (Cyanit, Disthen); W. H. TAYLOR: dasselbst S. 205 (Andalusit).
81. BOWEN, N. L. u. J. W. GREIG: *J. Amer. ceram. Soc.* Bd. 7 (1924) S. 238; *J. Wash. Acad. Sci.* Bd. 14 (1924) S. 183.
82. WARREN, B. E.: *Z. Kristallogr.* Bd. 72 (1929) S. 42.
83. ANDERSON, H. V. u. G. L. CLARK: *Ind. Engng. Chem.* Bd. 21 (1929) S. 924; s. a. B. E. WARREN u. W. L. BRAGG: *Z. Kristallogr.* Bd. 76 (1930) S. 201.
84. PAULING, L.: *Proc. Nat. Acad. Sci. U. S. A.* Bd. 16 (1930) S. 123.
85. JACKSON, W. W. u. J. WEST: *Z. Kristallogr.* Bd. 76 (1931) S. 211; Bd. 85 (1933) S. 160.
86. GRUNER, J. W.: *Z. Kristallogr.* Bd. 88 (1934) S. 412.
87. GIBBS, R. E. u. W. H. BRAGG. *Proc. Roy. Soc., Lond.* 109 A (1925) S. 405 110 A (1926) S. 443; 107 A (1925) S. 564.

88. MEISSNER, A.: Z. Physik Bd. 65 (1930) S. 158.
89. WYCKOFF, R. W. G.: Z. Kristallogr. Bd. 62 (1925) S. 189; Amer. J. Sci. (5) Bd. 9 (1925) S. 448.
90. GIBBS, R. E.: Proc. Roy. Soc., Lond. 113 A (1926) S. 351.
91. VEGARD, L.: Norske Vid. Akad. Oslo, I, Math.-Nat. Kl. (1925) Nr. 11.
92. ZWETSCH, A.: Ber. dtsh. keram. Ges. Bd. 15 (1934) S. 2.
93. BÜSSEM, W.: Tonind.-Ztg. Bd. 56 (1932) S. 1229.
94. ZÖLLNER, A.: Diss. Berlin 1908; Sprechsaal Keramik usw. Bd. 41 (1908) S. 256, 271, 287, 301, 313, 326; s. a. Lit. bei F. SINGER: Z. angew. Chem. (1926) S. 1273ff.
95. SOYCK, W.: Schweiz. Arch. angew. Wiss. u. Techn. (1936) Nr. 7.
96. SCHMIDT, W.: Ann. Physik (4) Bd. 9 (1902) S. 919; Bd. 11 (1903) S. 114.
97. SOYCK, W.: VDE-Fachber. (1935) S. 129.
98. HANDREK, H.: Arch. techn. Mess. (1935) Z. 944-3.
99. ALBERS-SCHÖNBERG, E., W. SOYCK u. A. UNGEWISS: Elektrotechn. Z. Bd. 56 (1935) S. 226; R. RIEKE u. A. UNGEWISS: Ber. dtsh. keram. Ges. Bd. 17 (1936) S. 237; E. ALBERS-SCHÖNBERG: daselbst Bd. 15 (1934) S. 199ff.; E. SCHWANDT: „Keramische Baustoffe für die Hochfrequenztechnik“, Leipzig 1933, S. 9—47; C. SCHUSTERIUS: Z. techn. Physik Bd. 16 (1935) S. 640.
100. KRAUSE, O. u. E. JÄEKEL: Sprechsaal Keramik usw. (1934) Nr. 34—36; Ber. dtsh. keram. Ges. Bd. 15 (1934) S. 485.
101. ALBERS-SCHÖNBERG, E. u. C. SCHUSTERIUS: Elektrowärme Bd. 3 (1933) Nr. 7.
102. KOHL, H.: Ber. dtsh. keram. Ges. Bd. 13 (1932) S. 70; Arch. techn. Mess. Z-944-4; Keram. Rdsch. Bd. 41 (1933) Nr. 3.
103. GEHLHOFF, G. u. M. THOMAS: Z. techn. Physik Bd. 6 (1925) S. 544.
104. SPÄTE, F.: Glastechn. Ber. Bd. 10 (1932) S. 521, bes. Lit. S. 537 u. 540.
105. SKAUPY, F.: Elektrotechn. Z. Bd. 51 (1930) S. 1745, 1768; F. SINGER: Arch. techn. Mess. Z-944-2; „Geschmolzener Quarz“ in M. PIRANI: Elektrothermie (1930), bes. S. 23.

#### Zusammenfassende Werke:

- Glastechnische Tabellen von W. EITEL, M. PIRANI u. W. SCHEEL, Berlin 1932.
- SOSMAN, R. B.: The Properties of Silica, New York 1927.
- SCHERING, H.: Die Isolierstoffe der Elektrotechnik, Berlin 1924.
- GEMANT, A.: Elektrophysik der Isolierstoffe, Berlin 1930.
- STÄGER, H.: Elektrotechnische Isoliermaterialien, Stuttgart 1931.
- LITTLETON, J. T. u. G. W. MOREY: The electrical properties of glass, New York 1933.
- Handbuch der Experimentalphysik von W. WIEN u. F. HARMS: Bd. 10 (1930).  
 Artikel „Elektrostatik“ von G. HOFFMANN und „Hochspannungstechnik“ von  
 W. O. SCHUMANN.

# Organische Isolierstoffe.

Von R. VIEWEG, Darmstadt.

## Einleitung.

Wenn auch die physikalischen Grundlagen im 1. Abschnitt dieses Buches (S. 1 ff.) ganz überwiegend für die anorganischen Isolierstoffe behandelt worden sind, so ist doch so vieles auf unser Gebiet übertragbar, daß hier mehr ein allgemeiner Überblick über die organischen elektrotechnischen Isolierstoffe gegeben werden soll. Die Beschränkung auf wenige physikalische Gesichtspunkte als bevorzugte Richtlinien für die Betrachtung gibt zugleich eine Zurückführung des Stoffumfanges auf ein erträgliches Maß. Wir treffen eine Auswahl, etwa dergestalt, daß zunächst in großen Zügen die Entwicklung überschaut wird, die sich auf unserem Gebiete seit der letzten ähnlichen Vortragsreihe des damaligen Elektrotechnischen Vereins im Winter 1920/21 abgepielt hat, und daß wir dann festzustellen suchen, was heute gilt, was erfolversprechend und zukunftsweisend sich durchgesetzt hat. Als vielleicht wichtigstes Kennzeichen der heutigen Sachlage können wir hervorheben, daß die organischen Stoffe, besonders die künstlichen, die in der Elektrotechnik Verwendung finden, nicht mehr eine getrennt dastehende Gruppe für sich bilden, sondern daß sie, sei es als Baustoffe, sei es für Sonderzwecke, in breiter Front überall in die Technik eingedrungen sind. Stoffe, die eben noch auf die Elektrotechnik beschränkt schienen, begegnen uns heute auch in anderen Gebieten der Technik. Wir treffen sie im Maschinenbau so gut wie im Haushalt, im Kraftfahrzeug und in der Textilindustrie, im chemischen Betrieb und im Feinwerkbau. Wir befinden uns heute mitten in einer Entwicklung, die ebenso chemisch und technisch glanzvoll wie wirtschaftlich bedeutsam ist. Gewiß gibt bei uns der Wille zur Rohstoff-Freiheit einen neuen starken Auftrieb, aber es darf nicht vergessen werden, daß der Umbruch in der Werkstoffauffassung, den wir erleben, allgemein ist. Auch in Ländern, wo man das Problem der devisengebundenen Stoffe nicht kennt, verläuft die Entwicklung in ähnlichen Bahnen wie in Deutschland. Überall sehen wir eine große Zunahme der Werkstoffe an Zahl, aber auch an Güte, vor allem an Anpassungsfähigkeit für die oft sehr harten Bedingungen technischer Sonderzwecke<sup>1</sup>.

<sup>1</sup> Vgl. z. B. DUNTON, A. und A. CARESS: Electr. Engng. Bd. 79 (1936.) S. 463; A. DUNTON: Electrician Bd. 116 (1936) S. 135.

Wenn man mit Recht in der modernen Technik als ein Maß für den Hochstand der Fertigung und damit als Maß für technisches Können überhaupt die Pflege der Werkstoffkunde ansieht, so gilt dieser Standpunkt bevorzugt für die Elektrotechnik, bei der die Werkstoffe, also auch die uns hier interessierenden Isolierstoffe, nicht nur mechanischen, thermischen und vielleicht auch chemischen Einflüssen ausgesetzt sind, sondern bei der führend und zusätzlich elektrische Beanspruchungen auftreten. Elektrische Isolierstoffe sollen isolieren, d. h. sie sollen in erster Linie Leiter trennen, allerdings können sie außerdem auch, wie etwa im Kondensator, als Sitz der elektrischen Energie Bedeutung haben. Die Pionierdienste, welche die Elektrotechnik mit ihren Isolierstoffen unzweifelhaft der ganzen modernen Werkstoffkunde geleistet hat, beruhen ebenso auf der Schärfe der elektrischen Bedingungen wie auf der Unbestechlichkeit und Feinheit elektrischer Meß- und Prüfverfahren. Bei der technischen Wirksamkeit von Isolierstoffen kann man drei Bereiche unterscheiden: Erstens und im allgemeinsten Sinne dienen sie der Sicherheit, d. h. sie schützen die Menschen, die spannungsführende Teile handhaben, vor unzulässiger Berührung. Zweitens sollen sie Energieverlust durch ungenutzt abwegig fließende Ströme vermeiden oder doch klein halten, und drittens sollen sie oft die energieführenden Leiter vor Angriffen, besonders chemischer Art — allgemein: vor Verrottung — schützen. Natürlich treten die drei Gesichtspunkte Sicherheit, Schutz der Energie, Schutz vor Verrottung, nicht immer in gleicher Weise auf, oft sind sie auch mit rein baulichen Anforderungen verwoben.

Mit den Stichworten „Sicherheit“ und „Schutz vor Energieverlust“ (der Verrottungsschutz kann in weitem Sinne gefaßt hier mit zugerechnet werden) haben wir zugleich die Leitmotive vor uns, nach denen die elektrotechnische Entwicklung der Isolierstoffe im letzten Jahrzehnt vor sich gegangen ist. Was auf dem Gebiete der Sicherheit geleistet worden ist, hat seinen sichtbaren Ausdruck in dem Standardwerk der VDE-Bestimmungen gefunden. Aus den mageren ersten Vorschriften für Isolierstoffe ist ein vielgliedriger stattlicher Teil des VDE-Buches<sup>1</sup> geworden, der die bewährten Arten von praktisch wichtigen Isolierstoffen erfaßt. Die prüftechnische Entwicklung wurde in feste Bahnen gelenkt, eine Verständigungsgrundlage zwischen Lieferer und Abnehmer wurde geschaffen, die heute zu einem festen Bestandteil des elektrotechnischen Lebens geworden ist. Gewiß bestehen noch Wünsche, besonders die Forderung nach größerer Beweglichkeit, nach rascherer Anpassung an den Jetztstand ist sicher berechtigt, aber das Positive überwiegt doch, und gerade in den heutigen Zeiten stürmischer Aufwärtsbewegung ist das zuverlässige Gerüst der Verbandsbestimmungen besonders wertvoll.

<sup>1</sup> 21. Aufl. Berlin 1937.

Auch in Richtung „Schutz vor Energieverlust“ ist natürlich in dem Vorschriftenbuch manches enthalten, ist doch die Verflechtung mit Sicherheitsfragen oft nur zu eng. Im großen ganzen aber ist die physikalisch-technische Seite der Isolierstoffe mehr der freien Entfaltung überlassen geblieben. Hier kennzeichnen die erwähnte erste Vortragsreihe und das aus ihr hervorgegangene bekannte Buch, das SCHERING 1924 herausgegeben hat, einen wichtigen Einschnitt. Dort wurde erstmalig in geschlossener, auf die praktisch-elektrotechnische Seite abgestimmter Form eine physikalische Theorie der technischen Dielektrika gegeben. K. W. WAGNER hat der Elektrotechnik diesen Dienst erwiesen, der sich in der Folgezeit sowohl für die physikalische Isolierstoff-Forschung als auch für die technologisch-chemische Weiterbildung als höchst wichtig erwies. Heute wissen wir, daß manches an diesen Lehren unzulänglich ist. Man kann mit dem Mehrschichtendielektrikum nicht alles erklären. Erst in der DEBYESchen Theorie, die den Zusammenhang zwischen Dipolmomenten und dielektrischen Verlusten geklärt hat, und in den neueren Auffassungen über den Durchschlag und die Wanderwellenvorgänge standen die wichtigsten Ergänzungen des Rüstzeugs zur Verfügung. Die neueren physikalischen Gesichtspunkte sind auf S. 10 ff. und S. 105 eingehend erörtert.

Mindestens ebenso wichtig wie die theoretischen Fortschritte sind die meßtechnischen Erfolge. Auch hier bedeutet jene Vortragsreihe einen Abschnitt. HARALD SCHERING gab damals seine Verlustmeßbrücke an, eine Anordnung, die wie wenige die Isolierstofftechnik gefördert hat. In der Messung der dielektrischen Verluste, mag sie nun nach dem bahnbrechenden SCHERINGSchen Verfahren erfolgen oder in abgewandelter Weise, haben wir ein Hilfsmittel, dessen Leistungsfähigkeit noch längst nicht ausgeschöpft ist. Es ist kein Zufall, daß heute nicht nur in der gesamten elektrotechnischen Isolierstoffkunde, von Starkstrom und Hochspannung bis hin zu den Ultrakurzwellen die Verluste Bewertungsgrundlage sind, sondern daß auch in der physikalischen Chemie für Untersuchungen von Molekülstrukturen und Dipolmomenten und in der forschenden Physik die Verlustmessung zusammen mit Bestimmungen der Dielektrizitätskonstanten so außerordentlich viel angewandt wird. Auch der Chemiker weiß heute, daß er den Anforderungen des verbrauchenden Ingenieurs um so besser gerecht werden kann, je mehr er die modernen physikalischen Meßverfahren benutzt.

### **Die organischen Isolierstoffe.**

Wir haben einen losen physikalischen Rahmen gezeichnet, innerhalb dessen sich die Entwicklung abgespielt hat. Nähere Darlegungen aus der Meß- und Prüftechnik bringt der nächste Vortrag (vgl. S. 83). Daher wollen wir uns nun zu den organischen Stoffen selbst wenden, die

als Isolierstoffe in der Elektrotechnik Anwendung finden. Die beiden großen Gliederungen Natur- und Kunststoffe sind zu naheliegend, als daß wir ihnen nicht folgen sollten, obgleich die Einteilung nicht in jeder Hinsicht befriedigt und nicht unumstritten ist.

### Naturstoffe.

Nur wenige Naturstoffe<sup>1</sup> können in unveränderter Form gebraucht werden, fast stets muß ein Reinigungs-, Bleich-, Aufschluß- oder sonstiges Verfahren oder eine chemische Umwandlung angewandt werden. Dies trifft z. B. beim Gummi zu, der darum von manchen Seiten mit Rücksicht auf die Veränderung, die er bei der Vulkanisation mit Schwefel erfährt, als ältester Kunststoff in Anspruch genommen wird. Wir wollen ihn und seine Verwandten Guttapercha und Balata bei den Naturstoffen führen. Im übrigen soll uns die Einteilung nur Ordnungsprinzip, nicht Bewertungsgrundlage sein. Gummi ist heute noch in der Leitungstechnik einer der wichtigsten Isolierstoffe, obgleich es schon möglich ist, gummifreie Leitungen hochwertig herzustellen. Hartgummi hat als Dielektrikum einen klassischen Namen. Die Vorzüge des Gummis, seine ausgezeichneten elektrischen und elastischen Eigenschaften, sind zu bekannt, als daß wir sie zu erörtern brauchten. Wir wollen vielmehr kritisch zuschauen, nach den Mängeln fragen, setzt doch bei ihnen die Verbesserungsmöglichkeit durch die Neustoffe ein. Der Hauptnachteil ist die Alterung; Gummi wird brüchig, sogar sehr schnell, wenn einer seiner Hauptfeinde, das Ozon,  $O_3$ , in hinreichender Konzentration auftritt. Das kann schon bei wenigen 1000 Volt Betriebsspannung der Fall sein, wie sie etwa für Leuchtröhrenanlagen gebraucht werden. Für den Physiker wie für den Mediziner war die Frage beweglicher Hochspannungsleitungen für Röntgenanlagen eine Zeitlang ebenfalls an die Meisterei des Ozonproblems geknüpft. Mit den Neustoffen, die Abhilfe geschaffen haben, gelang es auch, Leitungen herzustellen, die öl- und treibstoffest sind, denn der Gummi genügt in beiden Richtungen nicht.

Bei den Ölen ist gleichfalls die Alterungsfrage von großer Bedeutung; Anwendungsgebiete sind auch heute noch die Kabeltechnik, die für die üblichen Papierkabel dickflüssige Tränkmassen, gemischt aus Zylinderölen und Harzen, für spezielle Höchstspannungskabel dünnflüssige Öle benutzt, weiter der Transformatoren- und Schalterbau, der die zweitgenannte Ölart ausschließlich verwendet. Schließlich werden auch bei der Kondensatorenherstellung neuerdings Öle benutzt. Handelt es sich hierbei um sog. Mineralöle, also Stoffe, die aus dem Erdöl gewonnen sind, soweit nicht schon synthetische Erzeugnisse in Frage kommen, so ist bei den Ölen auch pflanzlicher und tierischer Erzeugnisse zu gedenken.

<sup>1</sup> Vgl. z. B. ETZ Bd. 54 (1933) Heft 23 (Sonderheft „Isolierstoffe“).

Genannt seien wenigstens Leinöl, Holzöl und Terpentinöl, alles wichtige natürliche Lackrohstoffe, deren Verdrängung durch ölarme oder gar ölfreie Stoffe schon beachtliche Fortschritte gemacht hat<sup>1</sup>.

Unter den Lackrohstoffen, die natürliche Erzeugnisse sind, haben wir auch Harze zu nennen, z.B. Kolophonium, Dammar, Kopal, alles ausländische Produkte, hier aber auch ein deutsches Gut, den Bernstein, der nach Art, Vorkommen und Verwendung eine Sonderstellung einnimmt. An der Grenze zwischen pflanzlichem und tierischem Erzeugnis liegt der Schellack, der bekanntlich durch Läuse erzeugt wird, die auf bestimmten Tropenbäumen schmarotzen (vgl. S. 160).

Eine weitere Gruppe natürlicher Isolierstoffe organischer Prägung kann aus den Asphaltten, Pechen, Wachsen gebildet werden. Gewinnung und letzte Verwendung sind zwar zum Teil recht unterschiedlich, aber der Bereich der Schmelzpunkte und die hieraus sich ergebende Handhabung als vergießbare Massengestatten die Zusammenfassung. Zum Teil handelt es sich um chemisch außerordentlich reine und hochwertige Erzeugnisse, man denke etwa an die Tränkmassen im Kondensatorenbau. In den Ozokeriten, oder besser den von ihnen abgeleiteten Zeresinen haben wir Stoffe von höchstem Isoliervermögen vor uns.

Groß ist die Anzahl der Faserstoffe, die in der Elektrotechnik Verwendung finden. Wir führen an Seide, Leinen, Jute, Hanf, Ramie und vor allem Baumwolle. Es ist klar, daß im Rahmen der Gegenwartsaufgaben die Umstellung auf künstliche Fasern stark gefördert werden wird. Im übrigen handelt es sich hier meist nicht um eigentliche Isolierstoffe, da ja alle Fasern stark Feuchtigkeit aufnehmen, sondern um sog. Trägerstoffe, die durch isolierende Tränkmittel, wie Lacke und Harze, erst mit zu Isolierstoffen werden (vgl. S. 160 u. 193).

Als letzte Gruppe der Naturstoffe seien die Hölzer genannt, die freilich für die Elektrotechnik ihre Bedeutung nicht als Isolatoren, sondern als Baustoffe haben. Holz wird dank seiner guten mechanischen Eigenschaften, seiner Preiswürdigkeit und Bearbeitbarkeit und der bequemen Verfügbarkeit in großen Längen weitgehend benutzt. Es gibt auch VDE-Leitsätze für die Bewertung und Prüfung von Holz als Isolierstoff, in denen auch einige Bestimmungen über Holzhalbzeuge enthalten sind. Natürlich hat man sich bemüht, den Hauptnachteil des Holzes, den großen Einfluß der Feuchtigkeit, durch Tränkung zu verringern. Wir dürfen hier, Späterem vorgehend, die sog. bakelisierten Hölzer, wie Lignofol, nennen. Mittelbar ist der Naturstoff Holz als Ausgangsstoff der Zellulose wichtig.

<sup>1</sup> Vgl. z. B. O. JORDAN: Die Entwicklung der Anstrichmittel auf wissenschaftlicher Grundlage. Z. angew. Chem. Bd. 49 (1936) S. 815.

### Kunststoffe.

Allen Naturstoffen ist eigentümlich, daß ihre Eigenschaften durch die natürliche Beschaffenheit in gewissen Grenzen gegeben sind, über die hinaus man auch durch sorglichste Behandlung nicht kommen kann. Solche Grenzen kennt der Kunststoff weniger. Bei ihm steht also der Züchtung hochrangigen Verhaltens ein weites Feld offen. Gewiß sind auch hier die Möglichkeiten endlich, und die Entwicklung einer bestimmten Eigenschaft geschieht fast immer auf Kosten einer anderen, aber durch Zusammenfügen mehrerer Stoffe lassen sich Wirkungen erzielen, die von Natur nicht erreichbar scheinen. Auf diesem grundsätzlichen Unterschied beruht die Überlegenheit der synthetisch gewonnenen sog. Kunststoffe gegenüber den besprochenen natürlichen. Es ist wichtig, sich diesen Unterschied klarzumachen, denn es ist etwas anderes, ob man Gegebenes veredelt oder ob man Neues aufbaut. Zugleich wird klar, daß bei den Kunststoffen die Chemie als Trägerin der Entwicklung in den Vordergrund rückt; die Ingenieurkunst hat ihr zu dienen.

Als jene erste Vortragsreihe abgehalten wurde, gab es auch schon Kunststoffe, aber wir gehen nicht so sehr fehl mit der Feststellung, daß der damalige Stand mit den beiden Standardnamen „Bakelite“ und „Pertinax“ umschrieben werden konnte oder doch von vielen Fachgenossen umschrieben wurde. Beide Bezeichnungen sind auch heute noch klangvoll, obwohl von einer Erschöpfung unseres Gebiets durch sie keine Rede mehr sein kann. Viele „. . . axe“ und „. . . ite“ sind seitdem auf dem Markt erschienen. Bakelite freilich ist auch jetzt noch der Inbegriff einer Pionierleistung. Man kann heute oftmals lesen, daß die Kunstharze in der Chemie schon seit Jahrzehnten, ja gewisse Polymerisationsprodukte schon seit fast hundert Jahren bekannt seien. Nun, das mag patentrechtlich wichtig, sicher auch wissenschaftsgeschichtlich interessant sein, technisch hat es nicht viel auf sich, denn die industrielle Entwicklung der Stoffe ist durchaus noch jung. BAEKELANDS Pionierpatent stammt aus dem Jahre 1908, die technische Herstellung begann noch später, bei manchen der zu besprechenden Stoffe läuft die technische Fertigung überhaupt erst an, und wir hoffen noch auf viele künftige Stoffe. Will man die historische Betrachtung vertiefen, so muß man feststellen, daß der erste plastisch formbare und bei hoher Temperatur zu einheitlicher Masse sinterbare Kunststoff des täglichen Gebrauchs das anorganische Hartporzellan ist, das BÖTTGER zu Beginn des 18. Jahrhunderts aus weißem Kaolin gewann. Entwicklung und Leistung der anorganischen Isolierstoffe sind im 1. Abschnitt dieses Buches (S. 1) dargetan. Hier sei nur ein Hinweis auf die Wirkung erlaubt, welche die Erfindung des Porzellans in der Folgezeit auf die Werkstoffe ausübte. Der Zinnteller ist zu einem Sammelgegenstand geworden. Wir erleben heute unter dem Gesichtspunkt der Sparmetall-



wirtschaft ähnliche Vorgänge, nur daß unsere Chemie jetzt mit einer sehr viel größeren Auswahl von Neustoffen aufwarten kann.

### Kondensate.

Bei den Kunststoffen, d. h. bei den synthetisch gewonnenen organischen Erzeugnissen, können wir nach der Herstellungsart zwei große Gruppen unterscheiden: Produkte durch Kondensation und durch Polymerisation. Unter Kondensation verstehen wir die chemische Vereinigung zweier niedermolekularer Ausgangsstoffe unter gleichzeitiger stofflicher Abspaltung, meistens von Wasser. Aus dem durch Kondensation gebildeten Stoff können die Bildner gewöhnlich nicht wieder abgetrennt oder zurückgewonnen werden. Praktisch ist noch wichtig, daß die hochmolekulare Endverbindung stufenweise entsteht. Man spricht daher neuerdings auch von Polykondensation. Am bekanntesten, obschon — es mag wie ein Scherz klingen — wissenschaftlich noch nicht unwidersprochen geklärt, ist der Kondensationsvorgang, bei dem aus Phenol,  $C_6H_5OH$ , und Formaldehyd,  $HCOH$ , ein Harz entsteht, das im Wege weiterer Kondensation aus dem Zustand A über B in den Endzustand C übergeführt wird. Nach etwas anderer Auffassung erhält man zunächst bei alkalischer Reaktion vornehmlich Resol, das über den Resitol-Zwischenzustand in das endgültige, unschmelzbare Resit übergeht. Bei Anwendung geringerer Mengen Formaldehyd und in neutraler oder saurerer Lösung entstehen sog. Novolacke, die zwar ebenfalls noch löslich und schmelzbar, aber nicht ohne weiteres, d. h. rein thermisch, härtbar sind. Wir erhalten also gleich am Anfang eine erstaunliche Fülle von Abwandlungen. Nehmen wir hinzu, daß nicht nur das Phenol, sondern auch die isomeren Kresole mit Formaldehyd Harz bilden, und daß es nicht nur auf die Mengen der Anteile, sondern auch auf die Wasserstoffionenkonzentration und die Kontaktmittel ankommt, so kann man wohl ahnen, welche Mannigfaltigkeit schon bei den Grunderzeugnissen, den reinen Harzen, zur Verfügung steht. Gehen wir aber erst zur Herstellung der Mischungen über, wie sie wirklich verarbeitet werden, so sind noch die Beschleuniger, vor allem die Füllstoffe, und zwar a) anorganische (Asbest, Glimmerstaub, Steinmehl u. a.), b) organische (Holzmehl, Faserstoffe usw.), Farbstoffe und sonstige Zusatzstoffe zu berücksichtigen. Die Zahl der möglichen Endstoffe wird damit schier unübersehbar. Wir wollen indessen bei den bisher besprochenen Phenoplasten nicht länger verweilen, erwähnt sei nur noch, daß die unmittelbare Verwendung von reinen Harzen im Preßverfahren erst eine Errungenschaft allerjüngster Zeit ist. Auch die Farbmöglichkeiten, die im Anfang begrenzt schienen, erstrecken sich heute bis zu zarten, hellen Tönen. Als Verbundstoffe haben die Phenolharze ebenfalls Bedeutung erlangt, so für die Herstellung von Körpern aus feingepulvertem Eisen,

z. B. für die Hochfrequenztechnik. Und wieder ist kennzeichnend, daß auch außerhalb der Elektrotechnik sich analoge Verwendungsmöglichkeiten bieten, hier etwa in der Bindung von Hartstoffen für Schleifsteine.

Eine wichtige Bereicherung erfuhren die künstlichen Werkstoffe durch Kondensationsprodukte, die aus Harnstoff,  $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ , gewonnen werden. Durch diese Stoffe ist vor allem das Farbproblem vorangetrieben worden, gestatteten doch die Aminoplaste erstmalig die Herstellung lichtbeständiger Stücke in Weiß und anderen hellsten Farben. An Stelle von Harnstoff kann auch Thioharnstoff,  $\text{CS}(\text{NH}_2)_2$ , verwendet werden, der z. B. in Richtung Wasserbeständigkeit gewisse Vorteile bietet.

Auch das Anilin,  $\text{C}_6\text{H}_5\text{NH}_2$ , bildet mit Formaldehyd als Kondensationsprodukt ein Harz. Diese Erzeugnisse, die erst im Aufkommen sind, unterscheiden sich wesentlich von den Pheno- und Aminoplasten dadurch, daß die letzte Umformung nicht notwendig unter Wasserabspaltung stattfindet, das Harz ist auch nicht ohne weiteres härtbar, vielmehr bleibt das verpreßte Erzeugnis trotz seiner Beständigkeit in gewissem Umfange rückführbar. Anilinharz ist in dünnerer Schicht gelblich, in dickerer Schicht tiefbraunrot. Auch gefüllt kann es verarbeitet werden, ebenso zu Hartpapieren. Die technische Entwicklung kann z. Zt. noch nicht abschließend beurteilt werden. Neuerdings ist die Herstellung härtbarer Anilinharzprodukte gelungen. Gerühmt werden hohe elektrische und mechanische Eigenschaften, wobei unter dem elektrischen Verhalten günstige Kriechstromeigenschaften besonders hervorgehoben werden (vgl. auch S. 191, wo eine Eigenschaftstafel gegeben ist).

Es gibt noch eine ganze Reihe von Kondensationsprodukten. Es würde aber wohl zu weit führen, sie alle aufzuzählen. Die wichtigsten sind genannt. Erwähnt sei noch die Glycerin-Phthalsäurereaktion, die zu Glyptalen, Alkydalen, Alphthalaten führen, Stoffen, die vornehmlich in der Lacktechnik, aber auch als Glimmerbindemittel Anwendung finden. Im Folgenden sind die wichtigsten Kondensate nochmals übersichtlich zusammengestellt.

#### Übersicht technisch wichtiger Polykondensate.

Zusammensetzung	Verwendung
Phenol + Formaldehyd Isomere Kresole + F.	„Phenoplaste“, härtbare Preßstoffe, auch Grundlage von Verbundmassen und Lacken
Harnstoff + Formaldehyd Thioharnstoff + F.	„Aminoplaste“ w. o.
Anilin + Formaldehyd	Nicht härtbare Preßstoffe (noch in Entwicklung)
Glycerin + Phthalsäure	Hauptsächlich für Verbund- und Lackstoffe
(Alkylpolysulfid) (Perduren)	(Kautschukartige Stoffe) (vgl. S. 75)

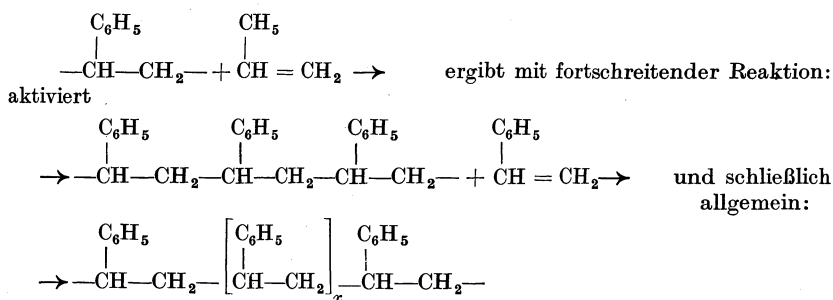
Fragt man nach der Allgemeinbedeutung<sup>1</sup> der Polykondensate für die Elektrotechnik, so steht die überlegene Wichtigkeit der Phenoplaste heute noch außer Zweifel. Diese Stoffe, die unter der harten Schule der Elektrotechnik groß geworden sind, haben umgekehrt der Meisterin reichlich das vergolten, was sie ihnen an Förderung hat zuteil werden lassen. Wenn in den folgenden Abschnitten Gestaltung und Verwendung der Isolierstoffe behandelt werden, dann wird deutlicher zutage treten, wie eng die Entwicklung der Kunststoffe mit der Elektrotechnik verknüpft ist. Ebensowenig wie die Preßteile aus der Niederspannungsinstallation (vgl. S. 186) wegzudenken sind, ebensowenig kann man sich die moderne Fernmeldetechnik ohne Preßstoffe und ohne stanzbare Hartpapiere (vgl. S. 220) vorstellen, und ebensowenig wären gewisse Fortschritte auf dem Hochspannungsgebiet ohne die Hochspannungshartpapiere (vgl. S. 165) möglich gewesen. Hier muß der allerwichtigsten Vorarbeiten gedacht werden, die überhaupt für die Ausbreitung der Kunststoffe bisher geleistet worden sind. Das hohe Verdienst muß anerkannt werden, das sich seit einem Dutzend Jahren die Technische Vereinigung von Fabrikanten gummifreier Isolierstoffe erworben hat, in der seit langem schon die Großzahl der einschlägigen Werke zur technischen Förderung zusammengeschlossen ist. In einer vom Staatlichen Materialprüfungsamt in Berlin unter Beteiligung der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt getragenen freiwilligen Überwachung ist Vorbildliches geleistet worden. Früher der Zentralverband der elektrotechnischen Industrie, jetzt die Wirtschaftsgruppe haben auf Grund der Arbeiten der technischen Ausschüsse eine Typisierung geschaffen, die richtunggebend für die ganze Entwicklung war. Zur Übersicht ist in der Zahlentafel I am Schlusse des Buches ein Ausschnitt aus der Typisierung in der jetzt im VDE-Buch verankerten Fassung gebracht, die allerdings außer den Phenoplasten und Aminoplasten auch noch Naturharzpreßstoffe und einige Sondermassen umfaßt. Selbstverständlich sind die Typisierung und die ihr zugrunde liegenden Anforderungen nichts endgültig Abgeschlossenes. Bei der heutigen raschen Entwicklung muß vielmehr in immer kürzeren Abständen die Anpassung an den neuen Stand der Technik erfolgen. Über Versuche, auf dem wichtigen Gebiet der Wärmebeanspruchungen die Prüfungen auszubauen, ist auf S. 101 berichtet. Hingewiesen sei auch auf die Normblätter DIN 7701 und 7702<sup>2</sup>.

<sup>1</sup> Vgl. z. B. W. ZEBROWSKI: ETZ Bd. 58 (1937) S. 469.

<sup>2</sup> Vgl. auch NITSCHKE: Bedeutung der Typisierung von Kunststoffen für nichtelektrotechnische Zwecke, in „Kunst- und Preßstoffe“, 2. Sonderheft, VDI-Verlag, Berlin 1937, S. 25.

### Polymerisate.

Die zweite große Gruppe umfaßt die Polymerisationserzeugnisse, Kunststoffe, von denen erst wenige eine gewisse elektrotechnische Bewährung aufweisen, während die meisten neuere Stoffe sind, die sich erst um Gelegenheiten zur Probeleistung bewerben<sup>1</sup>. Bei der Polymerisation werden Moleküle — sog. Monomere — einer ungesättigten Verbindung aktiviert. Durch eine Art Verkettung gehen sie in hochmolekulare Stoffe über, dadurch, daß durch Anlagerung eines neuen Grundmoleküls an das aktivierte ein polymeres aktiviertes Molekül entsteht, das wieder zu weiterem Wachstum durch Anlagerung immer neuer Grundmoleküle befähigt ist. Dieses Kettenwachstum schreitet so lange fort, bis schließlich durch eine Nebenreaktion die Kettenreaktion abgebrochen wird. Die wissenschaftliche Durchdringung dieses ganzen Gebiets, ja die Begründung des neuen Zweigs der Chemie, der sog. makromolekularen Chemie, ist vor allem H. STAUDINGER in Freiburg zu verdanken. Nach STAUDINGER spielt sich z.B. die Entstehung von Polystyrol aus Styrol,  $C_6H_5CHCH_2$ , in folgender Weise ab:



Solche Polymerisationen können durch Licht, durch Wärme oder durch besondere Katalysatoren eingeleitet werden. Polymerisierbar sind nur solche einfache chemische Verbindungen, die chemisch ungesättigt sind, die also andere einfache Verbindungen — unter gleichzeitiger Verringerung der eigenen Reaktionsfähigkeit — anlagern können. Je nach Art der Polymerisation<sup>2</sup>, die sich von spontaner, explosionsartiger Abwicklung bis zu langsamem, wohl beherrschtem Vorgang erstrecken kann, erhält man unterschiedliche „Makromoleküle“. Je nach der Anzahl der in einem Makromolekül vereinigten Grundmoleküle, also je nach dem Betrage der Zahl  $x$  im obigen Beispiel des Polystyrols, erhält man Erzeugnisse von niedrigem, mittlerem oder hohem Polymerisationsgrad. In jedem Falle aber liegen Stoffe vor, deren Moleküle nicht aus einigen Zehn oder Hundert, sondern aus Tausenden, vielleicht bis zu Millionen

<sup>1</sup> Vgl. z. B. H. RAALF: ETZ Bd. 58 (1937) S. 471.

<sup>2</sup> Vgl. E. DREHER: Z. Kunststoffe, Bd. 27 (1937) S. 137.

von Atomen aufgebaut sind. Wohl einer der wesentlichsten Unterschiede der sog. Hochpolymeren von den Niedermolekularen ist die kolloidale Struktur der Lösungen, welche die Polymerisationsprodukte ergeben. Bei der Erforschung des Polymerisationsgrades und der Molekulargewichte spielen drei überwiegend physikalische Verfahren eine wichtige Rolle: Messungen des osmotischen Drucks, der Zähigkeit von verdünnten Lösungen und Untersuchungen mittels der Ultrazentrifuge. Durch die gute Übereinstimmung der Ergebnisse nach so unterschiedlichen Verfahren kann die lange Zeit strittig erschienene STAUDINGERSche Auffassung über den Bau der Hochmolekularen heute als gesichert angesehen werden. Die den Stoffen zuzuordnenden Moleküle, die je nach der besonderen Lage ein- oder mehrdimensional zu denken sind, haben stattliche Größen. Man findet Stabmoleküle bis zu  $1\ \mu$  Länge, die also sichtbar sein würden —, wenn sie nicht wegen ihres geringen Durchmessers doch unter der Beobachtungsgrenze blieben. Die Bindung der Grundmoleküle zu Makromolekülen braucht nicht immer eindimensional zu erfolgen, sondern kann sich sogar auf alle drei Raumrichtungen erstrecken. Dreidimensionale Vernetzung ist z. B. nach HOUWINK bei den Polykondensaten aus Phenolen und Harnstoff mit Formaldehyd anzunehmen.

Am Beispiel des Polystyrols, das wohl das bisher bekannteste Polymerisat in der Elektrotechnik ist, sei der Zusammenhang zwischen dem Polymerisationszustand und den Eigenschaften erläutert. Polystyrol ist unter dem Handelsnamen Trolitul bekannt geworden und hat sich als sog. thermoplastischer Werkstoff besonders wegen seiner ganz geringen dielektrischen Verluste, die es auch bei höchsten Frequenzen aufweist, eine feste Stellung in der Elektrotechnik bereits gesichert. In Ergänzung der nachstehenden Übersicht muß noch erwähnt werden, daß beim Polystyrol die Herstellung von Folien, biegsamen Bändern und Fäden vor einigen Jahren auf physikalischem, und zwar mechanischem Wege gelungen ist; man hat die als Styroflex bezeichneten Erzeugnisse durch ein an das Streckspinnverfahren bei der Kunstseidenherstellung erinnerndes Verfahren zu bleibender Biegsamkeit bringen können<sup>1</sup>. (Siehe Zahlentafel 1, S. 72.)

Eine weitere Gruppe Hochpolymerer, die sich schon ein elektrotechnisches Anwendungsgebiet erobert hat, sind die polymeren Akrylate. Der Grundstoff, aus der Akrylsäure,  $C_2H_3COOH$ , gewonnen, stellt einen farblosen, kautschukartigen Körper dar, der sich durch hohe Beständigkeit gegen Ozon, Öl und Wasser auszeichnet. Hauptanwendungsgebiet war lange Zeit die Herstellung nichtsplitternden Glases, bei dem das „Plexigum“ als Zwischenschicht zwischen Silikatgläsern diente. Wir haben hier wieder ein Beispiel für die schon mehrfach erwähnte

<sup>1</sup> KIESER: Z. techn. Physik Bd. 16 (1935) S. 629.

Zahlentafel 1. Einige physikalische Eigenschaften von Polystyrol in Abhängigkeit vom Polymerisationsgrad. (Nach E. SAUTER.)

Polymerisationsgrad	Molekulargewicht	Art der Makromoleküle	Aussehen nach Ausfällen aus der Lösung	Mechan. Verhalten der Masse	Viskosität einer dünnen Lösung (z.B. 2%)	Verhalten beim Lösen (in org. Mitteln)	Folienbildung	Technische Eignung
bis 200	bis 20 000	Hemikolloide	pulverig	spröde, glasig-brüchig	nieder-viskos	quillt nicht	keine	für Lackzwecke
etwa 200 bis 1000	bis 100 000	Mesokolloide	etwas faserig	weniger Brüchig, fester	mittel-viskos	quillt merklich	nicht ausgeprägt	für thermoplastische Zwecke (Spritzguß)
über 1000	über 100 000	Eukolloide	langfaserig	zäh, elastisch, sehr reißfest	hoch-viskos	quillt stark	sehr gut	für Folien, Bänder, Fäden, Röhren

Verflechtung scheinbar ganz auseinander liegender technischer Anwendungen. Die Schnellebigkeit unserer Zeit, der rasche und innige Kontakt aller am technischen Leben Interessierten sprechen hier als Vermittler neuer Anregungen wohl ebenso mit wie die wissenschaftliche Durchdringung, die heute — gerade bei den Polymerisaten — die Vorausbestimmung gewisser Eigenschaften und ihre Abgrenzung gegeneinander gestattet. Wenn auch der sichere Ablauf der Erzeugungsprozesse manchmal noch sehr labil von glücklichen Kunstgriffen des Chemikers abhängt, so kann doch der Fortschritt im Ordnungsprinzip nicht geleugnet werden, mag er auch gleich wieder von einem Ansturm neuer Möglichkeiten zugedeckt erscheinen.

Doch zurück zu den Akrylaten. Polymere Akrylate werden nach einem besonderen Verfahren ähnlich wie Kautschuk zu verschiedenen Kunststoffmischungen verarbeitet, die unter dem Handelsnamen *Stabol* zusammengefaßt sind. Der Gehalt an — überwiegend anorganischen — Füllstoffen beträgt bei manchen Mischungen 70%. Elektrotechnisch allgemein und heute ganz besonders unter nationalwirtschaftlichem Gesichtspunkt interessiert die Anwendung als endlose Mäntel und Schläuche in der Kabel- und Leitungsherstellung. Die Bleiummantelung von Kabeln und Leitungen dient bekanntlich in erster Linie dem zuverlässigen Schutz der Isolation gegen Feuchtigkeit. Sie kommt daher überall dort zur Anwendung, wo starke Feuchtigkeit oder Nässe nicht vermeidbar sind, wie bei der Verlegung in der Erde, auf Schiffen usw. Das Beispiel der Schiffe zeigt andererseits kraß den Mangel, den die Bleibedeckung durch ihr hohes Gewicht hat. So sind schon seit einigen Jahren Bemühungen im Gange, den Bleimantel durch Kunststoffe zu ersetzen. Man kann hier

vielleicht einwenden, daß es sich dabei ja gar nicht um einen Isolierstoff, sondern um einen äußeren Bedeckungs- oder Schutzstoff handele, aber die Koppelung mit dem Isolierzweck ist ja gerade durch die erwähnte Aufgabe hergestellt. Es muß nun zugegeben werden, daß eine wichtige Eigenschaft des Bleis jetzt noch nicht erreicht ist, das ist die absolute Wasserundurchlässigkeit. Die Wasseraufnahme von Isolierstoffen ist schon lange eine wichtige Frage, die Durchlässigkeit ist erst neuerdings bedeutsam geworden. Als Maß dient der Diffusionskoeffizient, der angibt, wieviel Gramm Wasser in einer Stunde bei einem Druckunterschied von 1 mm Hg durch einen Zentimeterwürfel des Stoffes hindurchtreten. Die Mengen, um die es sich dabei für unsere Kunststoffe handelt, liegen bei  $10^{-8}$  bis vielleicht  $10^{-10}$  Gramm, so daß man schon alle Mühe hat, sie zu messen, aber wenn man die große Länge eines Kabels bedenkt und weiter die lange Dauer der möglichen praktischen Einwirkungen, dann sind wir von der Vermeidung des Bleis (oder ähnlicher Stoffe) beim Erdkabel jedenfalls noch ziemlich entfernt. Anders liegt es schon bei den der Überwachung zugänglichen Leitungen, wie z. B. auf Schiffen.

Zu den Akrylaten im weiteren Sinne gehören auch die Polymerisationsprodukte, deren Ausgangsstoff die  $\alpha$ -Methylakrylsäure — kurz Methakrylsäure genannt,  $C_5H_8COOH$  — ist. Erstes Anwendungsgebiet ist auch hier das Sicherheitsglas, das nunmehr ganz — unter Wegfall des Silikatglases — aus dem klar durchsichtigen organischen Stoff hergestellt werden kann. Die Polymethakrylate finden aber auch, hierin den Edelkunstharzen der Phenolgruppe vergleichbar, als Schnitzstoffe Verwendung und neuerdings auch als Preßstoff, so daß sie damit auch auf den elektrotechnischen Plan treten.

Den Akrylaten nahe steht eine weitere Gruppe von Polymerisaten, die als Polyvinyle bezeichnet werden können. Auch das Polystyrol (vgl. S. 71) gehört zu ihnen. Hier sind ferner zu nennen Polyvinyläther, Polyvinylacetat, Polyvinylchlorid und als neue, immer weitere Möglichkeiten eröffnende Gruppe die Mischpolymerisate. Handelsnamen sind für diese Mipolam, ferner allgemein Igelite mit dem Zusatz Igelit PCU, Igelit MP, je nach der besonderen Beschaffenheit. Hierher gehören auch die Vinapase, die sowohl in fester Form als auch als Lackrohstoffe in Anwendung sind. Auch bei diesen Stoffen sei auf eine Verwendung hingewiesen, die scheinbar gar nichts mit elektrischen Zwecken zu tun hat. Man stellt aus den Igeliten Rohre her, die durch ihre Unangreifbarkeit gegenüber vielen chemischen Agenzien und durch ihren hohen Grad von Wasserabweisung an Stelle hochwertiger Metalleitungen, z. B. an Stelle von Zinn, treten können. Die ganze Reihe der Eignungstypen ist bei den Vinylabkömmlingen vertreten. Wir finden sie als thermoplastisch formbare Massen, als kautschukartige Stoffe, als Verbund-, Klebe- und Tränkgüter, als

glashelle Folien und als Lackstoffe oder Anteile hierzu. Zur Veränderung der mechanischen und elektrischen Eigenschaften stehen der chemischen Industrie vor allem die Auswahl des Polymerisationsgrades und die Mischpolymerisation zur Verfügung. Bei der Polymerisation ergab sich, daß der kettenförmige Aufbau auch möglich ist, wenn man verschiedene Monomere alternierend beteiligt; ja, es ist auf diese Weise sogar möglich, eine an sich nicht polymerisierbare Komponente mit einer anderen zu einem Makromolekül zu vereinigen. Weitere Abwandlungen, die mehr den Verarbeiter betreffen, ergeben sich durch Füllstoffe und sog. Weichmacher. Als elektrotechnische Anwendung werden einstweilen Isolations- und Mantelmassen für die Leitungsindustrie, Isolierschläuche, Folien zur Leitungsbedeckung und für den Kondensatorenbau, aber auch Preß-, Form- und Hohlkörper genannt. Die Handelsnamen wechseln, wenn der Verbraucher durch eigene Abstimmung der Zugaben eine Stoffmischung mit spezifischen Eigenschaften erzeugt. Als ein Beispiel sei das Protodur angeführt, das aus den Igeliten hervorgegangen ist.

Noch ein Vinylabkömmling ist zu nennen, der eben als Neustoff auf den Markt kommt, das Luvican, auch Trolitul Luv genannt, das verspritzt und verpreßt werden kann. Beachtlich ist die für thermoplastische Stoffe hohe Wärmebeständigkeit nach MARTENS, die je nach Sorte bis zu 150° beträgt. Gerühmt wird der außerordentlich hohe spezifische Widerstand, sowie das günstige Oberflächenverhalten. Natürlich hat ein solcher Stoff auch seine Eigenheiten. Gespritztes Luvican weist eine Faserstruktur auf. Entsprechend ist die Festigkeit solcher Formkörper in der Spritzrichtung größer als in der senkrechten dazu. Der Gestalter hat hierauf beim Entwurf der Formen Rücksicht zu nehmen. Zum Kapitel werkstoffgerechtes Konstruieren wird in späteren Abschnitten noch manches gesagt werden (vgl. S. 155 u. 208).

Einige der bisher genannten Stoffe können, wie wir sahen, auch in hochelastischer, also kurz gesagt, kautschukartiger Form in Erscheinung treten. Es gibt aber auch neue Stoffe, bei denen dieser Zustand der charakteristische ist. Hierher gehört das Oppanol. Es ist ozonfest, wärmebeständig bis über 100°, vollkommen wasserunempfindlich, auch gegen Säuren, Alkalien und Salzlösungen beständig, ebenso auch gegen viele andere Lösungsmittel, aber es ist z. B. löslich in Benzin und Mineralölen. Interessieren wird noch der günstige Verlustfaktor, der bei Raumtemperatur und selbst bei 80° 0,5 vH. für 800 Hz nicht überschreitet. Als Anwendung kommt z. B. die Isolierung elektrischer Leitungen in Frage. Die Verarbeitung geschieht auf üblichen Strangspritzmaschinen, allerdings ist die Frage der Formbeständigkeit z. Zt. noch nicht abschließend geklärt.

Auch unter den kautschukartigen Stoffen wären noch manche zu erwähnen, z. B. die „. . . prene“, wie die amerikanischen Sorten Chloro-



pren, Dupren, aber auch das amerikanische Thiocoll und das ihm etwa entsprechende Perduren. Vor allem aber wird man hier erwarten, die deutschen Buna sorten genannt zu bekommen. Da indessen bei der Vielgestaltigkeit der Bedürfnisse der deutschen Wirtschaft diese Stoffe für elektrotechnische Zwecke vorerst kaum greifbar sind, wollen wir uns mit der Nennung begnügen. Auch auf die synthetischen Latices sei nur eben hingewiesen. Eine Übersicht der elektrotechnisch wichtigen Polymerisate ist nebenstehend gegeben.

Zu einem tieferen Verständnis der Mannigfaltigkeit organischer Isolierstoffe gelangt man, wenn den einzelnen Hauptgruppen von Verwendungsmöglichkeiten nachgegangen wird. Wir lernten härtbare Stoffe und feste Thermoplaste kennen und unterscheiden weiter kautschuk- und hornartige

Massen. Die Zugehörigkeit ist bei den einzelnen Stoffen umrissen worden. Besonders hervorgehoben werden sollen nochmals zwei elektrotechnisch wichtige Bereiche, die Lacke oder allgemeiner Oberflächenschutzmittel (vgl. S. 181) und die im gewissen Sinne artverwandten selbständigen Filme. Unter den Lacken und den mit einbegriffenen Verbundmassen finden wir fast alle Arten von Kondensaten und Polymerisaten. Es war gewiß eine besondere Leistung, die Phenolabkömmlinge unter den Harzen in einen lackmäßigen Zustand zu bringen. Als typische Vertreter seien die bekannten Albertole genannt.

Die Filmbildung oder besser die Foliengewinnung ist praktisch auf die Polymerisate beschränkt, findet aber hier zahlreiche Möglichkeiten. Im Grenzübergang von Folie und Film kommen wir zu einer weiteren wichtigen Verwendungsart, dem Faden oder der Faser. Hier ist noch wenig entwickelt; Möglichkeiten dürften verschiedene bestehen. Styroflex wurde bereits erwähnt, es liegt auch in fadenartiger Beschaffenheit vor, auch Polyvinylchlorid gestattet Fadenbildung, und zwar mit sehr hochwertigen elektrischen Eigenschaften. Indessen liegen diese Dinge wohl noch zu sehr in den Anfängen, als daß wir schon näher darauf eingehen könnten. Erst recht ist die elektrotechnische Anwendung noch offen.

### Zelluloseabkömmlinge.

Im allgemeinen ist der Begriff Faser im Kunststoffgebiet aufs engste mit einer Stoffgruppe verbunden, die neben den genannten einen großen

Übersicht technisch wichtiger Polymerisate.

Reine Kohlenwasserstoffe (nur C und H)	Kohlenwasserstoffverbindungen mit O, N, Cl, S
Polystyrol (Trolitul, Styroflex)	Polyakrylate (Plexigum, Stabol)
Oppanol	Polyvinylchlorid (PCU)
Buna	Mischpolymerisate (MP) Luvican (Perduren)

Anwendungsarten: fest; zäh-plastisch; als Folien; als Verbund-, Klebe-, Lackstoffe; als Fäden.

Raum einnimmt, der Zellulose (vgl. S. 156). Es wäre ein Leichtes, eine ganze Vortragsreihe über die elektrotechnische Verwendung der Zellulose zu halten. Wir müssen uns auf wenige Schlagworte beschränken. Das Stichwort Papier umschließt eine technische Welt. In der Elektrotechnik ist Papier mit und ohne Öltränkung Dielektrikum der Kabel<sup>1</sup>. Auch bei den Kondensatoren ist das Papier wesentliches Element, meist unter Tränkung mit Paraffinen, Wachsen oder Ölen. Und bei den Kunststoffen selbst spielt Papier eine wichtige Rolle, wir nennen Hartpapiere, aber auch einige Typen der Preßstoffe. Auch die Zellulose im engeren Sinne finden wir in Kunststoffen als Träger (z. B. Sonderpreßstoffe). Bei der Zellulose ist auch der Vulkanfaser zu gedenken, die zwar wegen ihres Feuchtigkeitsverhaltens elektrisch weniger wertvoll, aber durch ausgezeichnete mechanische Eigenschaften unter Umständen wichtig ist; auch Preßspan ist zu nennen. Die Azetylzellulose hat als Preß- und besonders als Spritzstoff Bedeutung, heute natürlich vor allem außerhalb der Elektrotechnik. Als Zweig neuerer Art sei die Benzylzellulose genannt (Benzyl  $C_6H_5CH_2$ ), die gleichfalls in fester Form und als Lackgrundlage vorliegt und in dieser Erscheinungsform bedeutsam zu werden verspricht. Zur Zellulose gehört auch das große Gebiet der Kunstseide, das ebenfalls in die Elektrotechnik hineinragt. Bei den natürlichen Faserstoffen haben wir umrissen, wie vielgestaltig ihre Verflechtung mit der Elektrotechnik ist. Überall, wo von alters her der Naturstoff verwendet wurde, besteht heute, immer mit dem Wunsch besondere Wirkungen zu erzielen, die Verpflichtung, heimische Stoffe anzuwenden, soweit sie schon greifbar sind. Das gilt ebenso von der Leitungsumspinnung wie vom Lackschlauch und nicht minder von den Einlagen im Kunstharz. Die Vermeidung der Sparstoffe braucht dabei nicht immer durch die gleiche Art im Kunststoff zu erfolgen, sondern die ganze Reihe der heimischen Stoffe kann zur Neugestaltung herangezogen werden. Der Isolierschlauch braucht weder den Öllack noch das Baumwollgespinnst. Ein Schlauch aus einem Polymerisat wird Gleich- oder Höherwertiges leisten, aber auch den Kunstseidenschlauch mit Nitrolack gibt es.

Sind wir früher in unseren Betrachtungen stufenweise vom massiven Stoff zum Faden übergegangen, so sei hier einmal der umgekehrte Weg beschritten. Wir finden die Kunstseide sozusagen in verbreiteter Form als Cellophan, dessen Anwendung zum Teil wegen der immerhin beachtlichen Wasserempfindlichkeit, zum Teil wegen der in den Weichmachern liegenden Gefahren, beschränkt blieb. Aussichtsreich scheinen in neuester Zeit die besonders von NOWAK geförderten Zelluloseabkömmlinge, die Triazetatfolien mit und ohne Weichmacher, zu sein. Nicht nur die Drahtbedeckung im Leitungsaufbau läßt sich hiermit durch-

<sup>1</sup> Z. B. WHITEHEAD: Impregnated Paper Insulation, New York 1935.

führen, auch der Kondensatorenbau und die mannigfaltigen sonstigen Bedürfnisse, bei denen man Filme benötigt, können Förderung erwarten. Jeder Fortschritt wird ja besonders begrüßt, wenn er dem allgemeinen Wunsche nach immer gedrängterer Bauweise entgegenkommt (vgl. S. 196).

Auch unser Rundgang durch den Zellulosebereich ist nur sprunghaft und unvollständig. Das Cellon, das als Lack und als fester Körper Verwendung findet und besonders wegen seiner Durchsichtigkeit geschätzt wird, haben wir z. B. noch nicht erwähnt.

### Sonderstoffe.

Eine Gruppe neuer synthetischer Stoffe, die wir gleichfalls nur streifen können, sind die Wachse. Beschränken wir uns hier auf ein über das Wachsgelbiet hinaus wichtiges Prinzip, die Chlorierung. Es ist ja erstaunlich, daß es eine ganze Menge Stoffe gibt, bei denen mehr als die Hälfte der Substanz Chlor ist, und denen man doch diesen sonst so gefürchteten Stoff nicht unmittelbar anmerkt. Aus den Polymerisaten gehört der Chlorkautschuk hierher; chlorierte Naphthaline sind als Wachse im Handel (Nibren, Haftax), auch das Diphenylchlorid ist zu nennen, das als nichtbrennbare Isolierflüssigkeit Verwendung gefunden hat (amerikanische Handelsbezeichnung Pyranol, in Deutschland Chlophen). Der Chlorgehalt wirkt im allgemeinen brennwidrig. Trotzdem sind die Elektrotechniker Stoffen wie den chlorierten Naphthalinen gegenüber etwas zurückhaltend. Unter Umständen doch austretende Chlorionen könnten zu gefährlich sein. Bei besonderer Vorsicht scheinen indessen keine ernsten Bedenken zu bestehen.

### Hilfsmittel.

Wir haben in ganz großen Zügen das Gebiet der organischen Werkstoffe für die Elektrotechnik durchheilt. Außer den Stoffgruppen und den Gruppen der Erscheinungsarten wären noch die Anpassungsmittel zu erörtern, die wir bisher kaum berührten. Da ist die Vulkanisierung, die den Kautschuk und die verwandten Kunststoffe brauchbar macht, da sind die Weichmacher, die in ähnlicher Weise eine gewünschte Plastizität herbeiführen. Mit den Weichmachern liegt es ähnlich wie mit dem Chlor, man hat immer Bedenken gegen den Austritt oder gar das Ausschwitzen von gewissen Anteilen. Außerdem bringen die Weichmacher oft die gewünschte Wirkung in der mechanischen Beschaffenheit auf Kosten der elektrischen Grundeigenschaften hervor. Auch auf die Trägerstoffe und Füllstoffe müßte man eigentlich näher eingehen.

Nach den Stoffen, den Anwendungsgebieten und den Anpassungsmitteln ist als viertes Einteilungsprinzip die Verarbeitungsart noch einmal herauszustellen. Da haben wir in erster Linie das auch heute noch überragende Preßverfahren mit überwiegender Bedeutung von Druck

und Hitze als erzeugenden physikalischen Mitteln. Vor einigen Jahren erfuhr das Verpressen in allseitig geschlossenen Formen eine wichtige Ergänzung durch das NOWACKSche Strangpreßverfahren, mit dem profilierte Stücke fortlaufend erzeugt werden können. Eine weitere Bereicherung der Herstellungstechnik trat mit dem Spritzgußverfahren auf, das bevorzugt für thermoplastische Stoffe entwickelt, aber nicht auf sie beschränkt ist. Auch durch reines Gießen können Formkörper gewonnen werden. Die Gummiindustrie hat in der Längsbedeckungs- und der Spritzmaschine spezifische Geräte. Kunststoffrohre kann man heute auch in einem Ziehverfahren herstellen. Auch die Folien und die Fadenbildung haben ihre eigenen Erzeugungsmaschinen, daneben natürlich für die Verarbeitung in den Flecht- und Behältermaschinen ebenfalls Sondereinrichtungen. Die Filmbildung, die überwiegend aus Lösungen erfolgt, hat selbstverständlich wieder ihre Besonderheiten.

Überblicken wir nun die umrissene Werkstofflage, so mag es scheinen, als ob wir glänzend dastünden. Mancher wird meinen, wenn wir so viel Kunststoffe haben, warum gibt es dann überhaupt noch die Austauschprobleme. Zur Beantwortung einer solchen Frage ist als Ausgangspunkt die eben angedeutete Gesamtlage der Verarbeitungstechnik geeignet. Die meisten neuen Stoffe haben ihre besonderen Erfordernisse, und seien es auch nur neue Temperatur- oder Druckbereiche vorhandener Anlagen. Das aber bedeutet entweder neue Maschinen oder doch neue Einrichtungen, jedenfalls bedeutet es Zeit, und es bedeutet auch wirtschaftlichen Aufwand. Wenn wir auch finanzielle Fragen hier nicht erörtern wollen, so soll das doch nicht heißen, daß sie nicht vorhanden oder nicht wichtig wären.

Fast von größerer Bedeutung als der maschinelle oder Ingenieurstandpunkt sind die physikalischen oder Eigenschaftsfragen. Zu jedem Stoff gehört heute eine Riesentafel von Werten. Da reichen die in der Typisierungsübersicht aufgeführten längst nicht aus. Und überall möchte man noch die Gewährleistungsgrenzen wissen, möchte die Eigenschaften auch noch in Abhängigkeit von der Temperatur und der Beanspruchungsdauer kennen. Dabei fehlt es oft genug an brauchbaren Meß- und Prüfverfahren, vor allem an handlichen, für die Versuchsfelder geeigneten. Wir wollen hier auf Einzelheiten der Werte nicht eingehen. Die Prüftechnik ist ja Gegenstand des nächsten Abschnitts (vgl. S. 83 und die Zahlentafeln S. 119). Werte für die einzelnen Stoffe findet man in den Merkblättern der Hersteller; in dem „Kunststofftaschenbuch“ ist auch eine bequeme Übersicht möglich. Nur eine Schwierigkeit sei aus der Fülle der physikalischen Problematik herausgegriffen: die Alterungsfrage. Ist es oft schon schwer, eine Eigen-

schaft überhaupt zu messen, so ist es doch noch viel verwickelter, zu bestimmen, wie diese Eigenschaft in langer Zeit sein wird, wenn viele, viele andere Beanspruchungen in kaum übersehbarer Weise mitgespielt haben. Unsere Ansprüche an die Lebensdauer elektrotechnischer Geräte sind hoch. Wir nehmen es als selbstverständlich hin, daß ein Kabel mehr als ein Menschenalter den Anforderungen genügt. Wird nun das, was uns die Erfahrung an den überkommenen Stoffen gelehrt hat, auch von den Neustoffen erfüllt werden? Sie bringen uns gewiß mehr. Manche Aufgaben, die mit den früheren Mitteln nicht lösbar schienen, hat der Kunststoff gelöst. Das Schachtkabel, mit dem man im Bohrloch in großer Tiefe noch saubere Leitfähigkeitsmessungen machen muß, ist mit Gummiisolation nicht herstellbar. Der Sonderkunststoff widersteht dem ungeheuren Druck und der gleichzeitig wirkenden chemischen Beanspruchung. Darum braucht derselbe Stoff aber noch nicht für eine Dauerbeanspruchung an sich viel geringerer Art, dafür aber auf Jahrzehnte wirksam, geeignet zu sein. Bleiben wir beim Leitungsbeispiel. Wird der in Kunststoff gebettete Leiter unverändert seine Lage beibehalten, oder wird er, wenn auch nur kurzzeitige Überbeanspruchungen die Hülle erweichen, langsam durchsacken und so vielleicht nach Jahren zum Kurzschluß führen? Von „kaltem Fluß“ spricht der Engländer und meint die angedeutete Gefahr. Es ergeben sich große Verantwortlichkeiten, nicht nur für den Kabelfachmann, sondern auch auf anderen Gebieten der Elektrotechnik. Die Verantwortung ist um so größer, als unbeirrbar fest die Höhe der elektrotechnischen Leistung stehen muß. Wieder sehen wir die Pionieranforderungen, die unser Fachgebiet für die breite Masse der Kunststoffanwendung zu erfüllen hat. Auch in der so veränderten, an Zahl verbreiterten, an Güte vertieften Rohstofflage wird die elektrotechnische Bewährung zu den wichtigsten Prüfsteinen gehören.

Die außerordentliche Bedeutung, welche die Kunststoffe in den letzten Jahren erlangt haben, hat nicht nur zur wirtschaftlich-technischen Organisation geführt, unter deren Spitzenleistungen wir die Typisierung der Kunstharzpreßstoffe kennenlernten, sondern auch die wissenschaftliche Forschung hat durch Zusammenschluß Förderung erfahren. Auf die Vorleistungen des Verbandes Deutscher Elektrotechniker wurde bereits hingewiesen. Der Verein Deutscher Ingenieure hat einen Fachausschuß für Kunst- und Preßstoffe<sup>1</sup> ins Leben gerufen mit dem Ziele, vom Ingenieurstandpunkt aus den Werkstoffen weiterzuhelfen. Wenn diese Bestrebungen auch nicht unmittelbar mit der Elektrotechnik zu tun haben, so ist heute bei der breiten Verknüpfung der Gebiete Hilfe an jedem Punkte wichtig. Besonders beachtlich ist es, daß auch die

---

<sup>1</sup> „Kunst- und Preßstoffe“ 1 u. 2, Sonderhefte VDI-Verlag, Berlin 1937.

Erzeuger selbst — die Chemiker — mit einer Fachgruppe für Chemie der Kunststoffe auf den Plan getreten sind.

Es kann nicht Wunder nehmen, daß die erstaunliche Vielgestaltigkeit den Wunsch nach Ordnungsprinzipien in jeder Form laut werden läßt. Die Typisierung erfaßt wohl noch das Wichtigste, greift vor allem maßgeblich marktregelnd ein. Unabhängig davon aber besteht der Wunsch nach wissenschaftlicher Vereinheitlichung der Grundfragen. Tatsächlich ist schon bei den Begriffserklärungen — am grünen Tisch sozusagen — Arbeit erwünscht. Obwohl in den Ergebnissen der elektrotechnischen Kommissionen, des Normen-Ausschusses und anderer Verbände Wertvolles vorliegt, steht die Schaffung einheitlicher, eindeutiger und wissenschaftlich einwandfreier Bezeichnungen und Einteilungen auf dem so stark angewachsenen Kunststoffgebiet noch in den Anfängen. Was sind Kunststoffe? Was sind plastische Massen? Was sind Preßstoffe? Gewiß werden wir im allgemeinen nicht über den Bereich unserer Arbeit, im Zweifel sein, aber jeder, der in der technischen Praxis steht, weiß, wie brennend oft das Bedürfnis nach genauen Abgrenzungen ist. Wir brauchen uns z. B. nur in die Lage einer staatlichen Überwachungsstelle zu versetzen. Chemiker und Physiker verstehen unter „Kunstharz“ den Inbegriff amorpher organischer Mischungen, die in unterkühlter Schmelze keine wesentlichen Kristallisationseigenschaften zeigen. Diese wissenschaftliche Beschreibung ist nicht unumstritten, jedenfalls zeigt sie, daß einfache technisch brauchbare Grenzen schwierig sind. Andererseits läßt sie uns die ganze Weite wissenschaftlicher Aufgaben erkennen. Wir bemerken in den Beziehungen zwischen den Kunstharzen und den Gläsern (vgl. S. 54) eine verheißungsvolle Verknüpfung des neuen Gebietes mit einem sehr alten Zweige der Technik. Ziemlich geklärt hat sich der Begriff „Kunststoffe“, unter dem im wesentlichen die organischen synthetischen Neustoffe verstanden werden, nicht dagegen die keramische Werkstoffgruppe, die in sich geschlossen einen getrennten Bereich bildet. Einige Übergänge bestehen, so werden die anorganischen Typen Y und X mit zu den Kunststoffen gerechnet, auch einige Preßstoffe mit Naturharzen.

Verschiedene Versuche sind unternommen worden, um zu einfachen Einteilungen zu gelangen<sup>1</sup>. Blicken wir freilich auf die besprochenen Neustoffe, so wird es mit einfachen Kurzbezeichnungen schwierig, und wo soll man die so aussichtsreichen Mischpolymerisate unterbringen, deren Zusammensetzung begrifflicherweise nicht bekannt gegeben wird? Es scheint doch, daß der Grundgedanke der deutschen Typisierung, Einteilung im wesentlichen nach physikalischen Eigenschaften unter Rahmenangabe von Richtlinien der Zusammensetzung und Verarbeitung,

<sup>1</sup> Vgl. z. B. H. STÄGER: Bull. Schweiz. elektrotechn. Ver. (1936) Nr. 18.

durchaus zweckmäßig ist. Eine Übersicht in großem Rahmen, mit dem Ziele auch internationaler Anwendbarkeit, wird sich vielleicht durch Einbau in die Dezimalklassifikation erreichen lassen.

Eine andere Frage ist die Ergänzung der Werte. Hier ist allerlei im Gange. Ich nenne als Beispiel die Untersuchungen von NITSCHÉ über Dauer-Wärmefestigkeit<sup>1</sup> (vgl. auch S. 101). Schauen wir nicht nur auf die typisierten Stoffe, sondern ziehen wir den ganzen Bereich in Betracht, so interessieren heute besonders auf physikalisch-chemischem Gebiet die Quellung und die Wasserdurchlässigkeit, auf rein thermischem Gebiet das Verhalten bei sehr hohen und tiefen Temperaturen. Elektrisch ist wohl der Verlustfaktor Trumpf. Mechanisch geht es neben der Reißfestigkeit als Standgröße um die dynamischen Dauerbeanspruchungen<sup>2</sup>. Allgemeinbegriff über allen ist die Alterung. Eine Übersicht über die neueren Anforderungen an Isolierstoffe ist nachstehend gegeben.

#### Neuere Anforderungen an Isolierstoffe.

Mechanische Eigenschaften	Allgemeine technologische Eigenschaften
Dauerfestigkeiten	Oberflächenverhalten
Dynamische Festigkeiten	Quellung
(Druck, Zug, Drillung)	Diffusionsverhalten
Reißfestigkeit	Alterung
Thermische Eigenschaften	Gefüge
Verhalten bei hohen und tiefen Temperaturen	Lichtbeständigkeit
Wärmeleitung	Elektrische Eigenschaften
Wärmedehnung	Verluste, Dielektrizitäts-Konstante
Spezifische Wärme	Dauerbeanspruchung, besonders zusammen mit anderen Prüfungen.

Welche Folgerungen aus dem heutigen Stand der chemischen Leistungen für den Gestalter zu ziehen sind, werden die Abschnitte über die einzelnen Fachgebiete zeigen (vgl. S. 155, 186, 220). Die Verantwortlichkeit freilich trifft nicht den elektrotechnischen Gestalter allein, sie beginnt beim Chemiker, und der Verbraucher hat auch sein Teil zu tragen; das Wichtigste aber bleibt in jedem Falle der Wille zur Tat.

### Aus dem Schrifttum.

#### Bücher:

- SCHERING, H.: Die Isolierstoffe der Elektrotechnik. Berlin 1924.  
 SCHEIBER u. SÄNDIG: Die künstlichen Harze. Stuttgart 1929.  
 STÄGER, H.: Elektrotechnische Isoliermaterialien. Stuttgart 1931.  
 WARREN, H.: Electrical Isolation Materials. London 1931.  
 MEHDORN, W.: Kunstharzpreßstoffe, Eigenschaften, Verarbeitung und Anwendung. Berlin 1934.

<sup>1</sup> NITSCHÉ u. SALEWSKI: Plastische Massen Bd. 7 (1937) Heft 1 u. 2.

<sup>2</sup> Vgl. THUM, GRETH u. JACOBI: „Kunst und Preßstoffe“, 2. Sonderheft, VDI-Verlag (1937), S. 16.

SOMMERFELD, Plastische Massen. Berlin 1934.

SCHIEBER, J.: Kunststoffe. Leipzig 1934.

HOUWINK, R.: Physikalische Eigenschaften und Feinbau von Natur- und Kunstharzen. Leipzig 1934.

Verwendung und Zusammensetzung, Konstruktion und Fabrikation sowie Prüfung von Preßstofffabrikaten, Vorträge auf der Preßstofftagung Leipzig 1935; s. auch ETZ Bd. 56 (1935) Heft 10.

Zur Entwicklung der Chemie der Hochpolymeren. Berlin: Verlag Chemie 1937.

ELLIS, C.: The Chemistry of Synthetic Resins, 2 Bde., 2. Aufl. New York 1935.

PABST, F.: Kunststoff-Taschenbuch, 2. Aufl. Berlin 1937.

BRANDENBURGER, K.: Herstellung und Verarbeitung von Kunstharzpreßmassen, Bd. I—IV. München 1934 bis 1937.

VDE-Vorschriftenbuch, 21. Aufl. Berlin 1937.

DIN-Blätter, z.B. DIN 7701 und Entw. 7702.

#### **Sonder-Zeitschriften:**

Kunststoffe. München: J. F. Lehmanns Verlag.

Plastische Massen. Berlin: Verlag Physik.

#### **Neuere Aufsätze über Kunststoffe.**

STAUDINGER, H.: Über die makromolekulare Chemie. Z. angew. Chem., Bd. 49 (1936) S. 801.

KRÄNZLEIN, G.: Entwicklung, Umfang, Bedeutung und Chemie der Kunststoffe. Z. angew. Chem. Bd. 49 (1936) S. 917.

NOWAK, P. u. H. HOFMEIER: Über Möglichkeiten zur Anwendung von neuen Kunststoffen. Die Chem. Fabrik Bd. 10 (1937) S. 13.

SAUTER, E.: Künstliche organische Werkstoffe. Z. VDI Bd. 81 (1937) S. 17.



# Prüfung von Isolierstoffen und Meßergebnisse aus der Isolierstofftechnik.

Von G. PFESTORF, Berlin.

Über den Vorträgen steht als Leitgedanke „Entwicklung, Gestaltung und Verwendung elektrotechnischer Isolierstoffe“. Alle drei Gebiete sind aber so stark von den aus Prüfungen ermittelten Eigenschaften abhängig, daß ein Vortrag über die Prüfung von Isolierstoffen in dieser Reihe berechtigt ist.

Bei der Untersuchung von Isolierstoffen wollen wir zunächst unterscheiden zwischen „Prüfen“ und „Messen“ und dabei unter Prüfen all das verstehen, was bei der Herstellung im Prüffeld Tag für Tag laufend angewandt wird. Im Gegensatz dazu sollen Messungen auf Untersuchungen im Laboratorium beschränkt sein. Man erkennt, daß zwischen beiden Gebieten enge Beziehungen bestehen und das eine sehr wohl in das andere übergehen kann. Der Grund zur Unterscheidung ist nur ein rein äußerlicher; die Prüfverfahren für Isolierstoffe liegen sowohl in Deutschland wie auch in anderen Ländern weitgehend fest. Sie sind aus der Praxis allgemein bekannt und in dem Vorschriftenbuch des VDE in den Druckschriften 0302 bis 0370 eingehend beschrieben. Sie sollen uns daher nicht weiter beschäftigen. Der Vortrag will versuchen, mit der Entwicklung einiger Prüf- und Meßverfahren vertraut zu machen, die im Hinblick auf die Bewertung neuer Isolierstoffe notwendig wurden oder die lediglich zur Erkenntnis der physikalischen Vorgänge im Isolierstoff dienen.

## I. Prüfung von Isolierstoffen.

**Bewertung.** Für die Bewertung der Isolierstoffe dienen die zahlenmäßigen Angaben, die aus Prüfungen gewonnen werden und die hier als bekannt vorausgesetzt werden sollen (vgl. die Zahientafeln am Schlusse des Buches und auf S. 118). Es werden im folgenden nur einige besondere Versuchsergebnisse angeführt. Auf einen Punkt muß jedoch hingewiesen werden: Isolierstoffe sind technische Erzeugnisse und zeigen gewisse Streuungen ihrer Eigenschaftswerte. Es ist wichtig, diese Streuung zu kennen und durch laufende Überwachung sich davon zu überzeugen, daß Mindestwerte der physikalischen Eigen-

schaften nicht unterschritten werden. Angaben hoher Werte, die gelegentlich unter besonderen Vorsichtsmaßregeln bei der Herstellung erreicht werden, sind auf Werbeblättern unerwünscht und werden erfreulicherweise nicht mehr oft angetroffen.

Eine Sonderstellung in bezug auf die Innehaltung gewisser Mindestwerte nehmen die Isolierpreßstoffe ein. Hier zeigen Stoffgruppen, die z. T. rein äußerlich für den mit Einzelheiten nicht vertrauten Konstrukteur nicht ohne weiteres zu unterscheiden sind, beträchtliche Unterschiede in ihren physikalischen Eigenschaften. Die Technische Vereinigung von Fabrikanten gummifreier Isolierstoffe hat für diese gummifreien, nicht-keramischen Stoffe eine Einteilung geschaffen, in der die Mindestwerte festgelegt sind. Die Innehaltung dieser Mindestwerte wird laufend überwacht, und aus dem Zeichen der Überwachung, das auf jedem Isolierstoff angebracht ist, erkennt der Konstrukteur sowohl den Stoff wie auch den Hersteller. Abb. 61<sup>1</sup> gibt das Zeichen der Überwachung wieder, zugleich sei auch auf S. 69 und die Zahlentafel am Schlusse des Buches verwiesen.



Abb. 61. Überwachungszeichen für Isolierpreßstoffe.

Der technische Fortschritt hat ganz ähnliche Verhältnisse auf dem Gebiete der keramischen Werkstoffe hervorgerufen. Auch hier sind viele Sondermassen entwickelt worden, die selbst für den Fachmann rein äußerlich nicht unterscheidbar sind. Eine Kennzeichnung erscheint für die Erzeuger wie für die Verbraucher erwünscht und wird vielleicht in absehbarer Zeit einmal vereinbart werden. Es besteht bereits eine Übersichtszahlentafel, die am Schlusse des Buches abgedruckt ist (vgl. auch S. 122).

**Sicherheit.** Das Ziel aller elektrotechnischen Prüfungen ist letzten Endes die Sicherheit im fertigen Erzeugnis, die Vermeidung von unzulässig hoher Erwärmung und die Verhinderung von Durchschlägen durch den Isolierstoff. Genau so wie der Baumeister sich vor dem Einstürzen seiner Bauwerke zu schützen hat, muß es die Aufgabe des Elektrotechnikers sein, Versagen der Isolation eines Geräts auszuschließen. In der Isolierstofftechnik liegt jedoch ebenso wie in dem viel älteren Baugewerbe der Begriff der Sicherheit absolut noch nicht fest. Nach den bisherigen Erfahrungen verlangt man einmal eine doppelte Spannungsbeanspruchung, ein anderes Mal hält man die 1,4fache als Maß der Sicherheit für ausreichend. Man hat gelegentlich der Isolierstofftechnik aus dieser Unbestimmtheit einen Vorwurf gemacht, wahrscheinlich jedoch mit Unrecht, denn wenn selbst auf dem viel älteren Gebiete der Bau-

<sup>1</sup> Plastische Massen Bd. 5 (1935) S. 372.

technik der Begriff der Sicherheit noch nicht in allen Fällen klar ist, um wieviel mehr kann er bei der noch jungen Isolierstofftechnik schwanken.

Auch in der Bautechnik überträgt man die an einem Modell gewonnenen Versuchsergebnisse auf das Fertigerzeugnis, das Bauwerk, obwohl man weiß, daß sich nicht alle Daten der Sicherheit an einem Modell ermitteln lassen. Dies trifft ebenso für die Isolierstoffe zu, bei denen man zwar an Stoffproben die Eigenschaften messen kann, an den Fertigteilen jedoch trotzdem noch gewisse Sicherheitsprüfungen ausführen muß.

**Elektrische Untersuchung.** Für die Verwendung von Isolierstoffen in der Elektrotechnik sind die elektrischen Prüfungen von ausschlaggebender Bedeutung. Es soll daher im folgenden mit ihrer Behandlung begonnen werden. Als Prüfkörper verwendet man in vielen Fällen Platten von  $150 \times 150 \text{ mm}^2$  Fläche und einigen Millimetern Stärke, an denen die wichtigsten Stoffeigenschaften ermittelt werden können. Für die Untersuchung müssen die Isolierstoffe mit Elektroden versehen werden; diese Elektroden können aufgeklebt, aufgespritzt, aufgedrückt oder aufgegossen, in manchen Fällen auch aufgebrannt werden<sup>1</sup>. Ein Verfahren, das sich in allen Fällen als unbedingt zuverlässig erwiesen hat, gibt es nicht. Guten Kontakt geben Belegungen aus Quecksilber, aus aufgespritztem Zink, Kupfer oder Nickel und aus Edelmetallen sowie Metallbelegungen, die nach einem chemischen oder physikalisch-chemischen Verfahren aufgebracht werden. Auch das Verfahren des Aufziehens von Belegungen aus Blattsinn mit einem dünnen Hauch von Paraffinöl hat sich oft bewährt. Besondere Vorsichtsmaßregeln sind anzuwenden, wenn Messungen in Abhängigkeit von Temperatur oder Feuchtigkeit vorzunehmen sind, oder wenn vergießbare Massen sowohl im flüssigen wie im festen Zustand beim allmählichen Erstarren untersucht werden sollen<sup>2 3</sup>.

**Brückenverfahren**<sup>4</sup>. Einen weiten Raum in der elektrischen Prüf- und Meßtechnik nehmen die Brückenverfahren ein. Diese werden zur Messung sehr vieler Größen, z. B. des Stromes, der Spannung, der Frequenz, der Kapazität und der Induktivität benutzt. In der Isolierstofftechnik sind die Verfahren von Bedeutung, welche die Messung der Kapazität und damit der Dielektrizitätskonstanten und des dielektrischen Verlustfaktors ermöglichen, denn diese beiden Größen kennzeichnen vorwiegend die Güte des Isolierstoffes in elektrischer Beziehung. Die Dielektrizitätskonstante gibt an, um wieviel stärker die

<sup>1</sup> PFESTORF, G.: ETZ Bd. 51 (1930) S. 275.

<sup>2</sup> VIEWEG, R. u. G. PFESTORF: ETZ Bd. 57 (1936) S. 632.

<sup>3</sup> HARTSHORN, L., W. H. WARD, B. A. SHARPE, B. J. O'KANE: Journ. JEE. Bd. 75 (1934) S. 730.

<sup>4</sup> KRÖNERT, J.: Meßbrücken und Kompensatoren. München 1935.

elektrische Ladungsdichte auf einem Körper ist als in Luft, die der gleichen elektrischen Feldstärke ausgesetzt ist, während der dielektrische Verlustfaktor die Tangente des Winkels ist, der den Phasenwinkel zwischen Strom und Spannung zu  $90^\circ$  ergänzt.

Die ganze Kunst, mit beliebig aufgebauten Brückenordnungen richtig zu messen, besteht darin, die möglichen Fehler zu erkennen. Meist lassen sich dann auch Mittel zu ihrer Beseitigung finden.

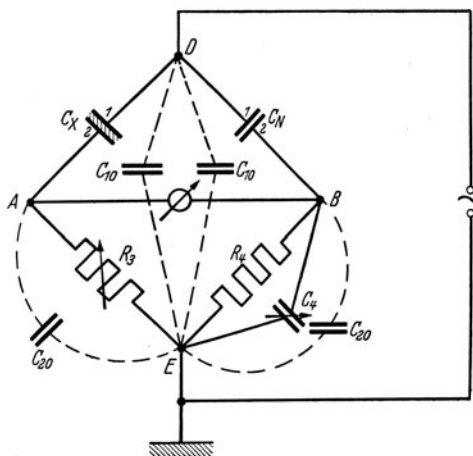


Abb. 62. SCHERING-Brücke mit Nebenkapazitäten.

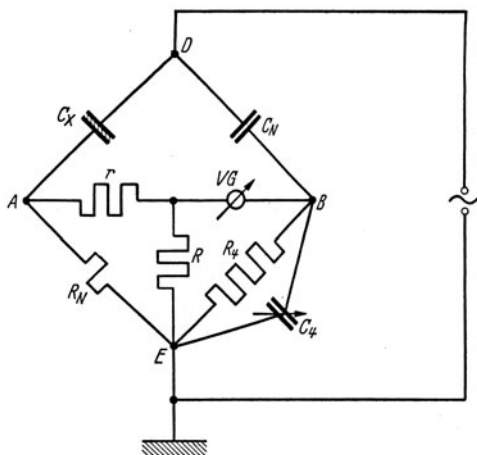


Abb. 63. Brücke mit Nebenschluß für die Messung großer Kapazitäten.

Gewisse Fehler im Aufbau werden leicht durch Veränderung des Brückenverhältnisses festgestellt. Die wohl am meisten angewandte Anordnung für Isolierstoffuntersuchungen ist die Brücke nach SCHERING. Welche Fehler hier durch kapazitive Nebenschlüsse möglich sind, zeigt Abb. 62. Jeder Kondensator besitzt sowohl eine Kapazität zwischen den eigentlichen Meßbelegungen, bezeichnet mit  $C_{12}$ , wie auch zwischen jeder Meßbelegung und Erde, bezeichnet mit  $C_{10}$  und  $C_{20}$ . Für die Berechnung des Brückengleichgewichtes kann man sich diese Kapazitäten  $C_{10}$  und  $C_{20}$  in den Brückenpunkten  $A$ ,  $B$  und  $D$  konzentriert vorstellen, wie es aus Abb. 62 ersichtlich ist. Auch die Widerstände  $R_3$  und  $R_4$  besitzen gegen Erde eine Kapazität, die in der abgebildeten Brückenanordnung ebenfalls parallel zu den Zweigen 3 und 4

liegen würde. Wenn diese Kapazitäten mit  $C_4$  vergleichbar werden, bewirken sie eine Fehlmessung von  $\text{tg } \delta$ . In ähnlicher Weise können natürlich auch Fehler durch Widerstände oder Selbstinduktionen in

den Zuleitungen eintreten. Die graphische Darstellung der Brückenverhältnisse gibt einen guten Einblick in die Zusammenhänge der verschiedenen Einstellwerte<sup>1</sup>.

**Messung großer Kapazitäten.** Schwierig werden die Messungen großer Kapazitäten. Der Strom durch den Kondensator  $C_X$  kann die Parallelschaltung eines kleinen Widerstandes  $R_N$  (siehe Abb. 63) erfordern, damit die Spannung am Punkt  $A$  nicht zu hoch wird, und durch die hohen Ströme können, abgesehen von magnetischen Beeinflussungen, leicht Fehler bei unsachgemäßem Aufbau entstehen.

Zunächst werden alle Störungen, die durch eine gegenseitige Beeinflussung der einzelnen Zweige möglich sind, dadurch behoben, daß man die Brückenleitungen bifilar nach Abb. 64 anordnet<sup>2</sup>. Um für diese Brückenordnung einen

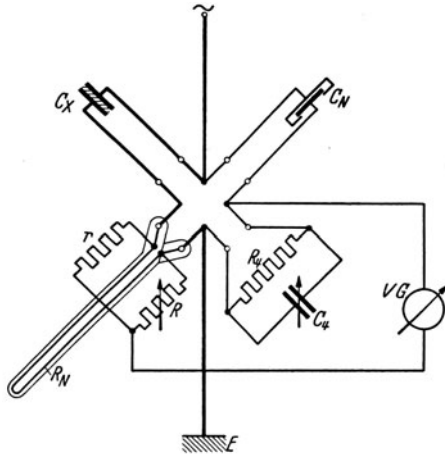


Abb. 64. Brücke für die Messung großer Kapazitäten in bifilarer Anordnung.

Anhaltspunkt über den Einfluß einiger Schaltfehler auf das Meßergebnis zu gewinnen, sind die wichtigsten unter Berücksichtigung möglicher Zusatzglieder (Selbstinduktionen, Widerstände) im folgenden zusammengestellt.

Zweig  $R_N$  mit Selbstinduktion  $L$

$$C_X = \frac{C_N R_4 (r + R + R_N)}{R_N \cdot R}$$

$$\operatorname{tg} \delta_X = \omega R_4 C_4 - \omega R_4 C_N \frac{r}{R} + \omega \frac{L}{R_N}$$

Widerstand  $R$  mit Selbstinduktion  $L$

$$C_X = \frac{C_N R_4 (r + R + R_N)}{R_N \cdot R}$$

$$\operatorname{tg} \delta_X = \omega R_4 C_4 - \omega R_4 C_N \cdot \frac{r}{R} \cdot \frac{\omega L}{r + R + R_N}$$

Brückeneckpunkt  $E$  über einen Widerstand  $Z$  mit  $R_N$  und  $R$  verbunden:

$$C_X = \frac{C_N R_4 (r + R + R_N)}{R_N R + Z (r + R + R_N)}$$

$$\operatorname{tg} \delta_X = \omega R_4 C_4 - \omega R_4 C_N \cdot \frac{R_N \cdot r}{R_N R + Z (r + R + R_N)}$$

<sup>1</sup> ALTEN: ETZ Bd. 57 (1936) S. 807.

<sup>2</sup> ZICKNER u. PFESTORF: Z. techn. Physik, Bd. 12 (1931) S. 219.

Kapazität  $K$  mit Selbstinduktion  $L$ :

$$C_X = K(1 + \omega^2 KL).$$

$$\operatorname{tg} \delta_X = \omega R_4 C_4 - \omega R_4 C_N \frac{r}{R}.$$

Widerstand  $R$  mit Selbstinduktion  $L$ :

$$C_X = \frac{C_N R_4 (r + R + R_N)}{R_N R}.$$

$$\operatorname{tg} \delta_X = \omega R_4 C_4 - \omega R_4 C_N \frac{r}{R} + \frac{\omega L}{R} \cdot \frac{r + R_N}{r + R + R_N}.$$

**Messung kleiner Kapazitäten.** In Verbindung mit dem Normalkondensator ohne Anfangskapazität nach ZICKNER<sup>1</sup> ist mit dem Brücken-

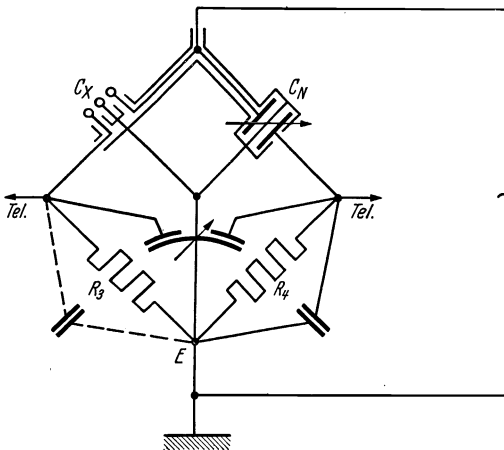


Abb. 65. Brückenschaltung nach ZICKNER für die Messung sehr kleiner Kapazitäten.

verfahren die Messung auch sehr kleiner Kapazitäten möglich.

Das Schaltschema zeigt Abb. 65. Der Normalkondensator  $C_N$  besteht aus einem Gehäuse, das durch eine Trennwand in zwei Kammern geteilt ist. Die Trennwand besitzt zwischen den Belegungen einen Ausschnitt, der z. B. nach Art einer Irisblende durch Drehen verändert werden kann. Die Trennwand ist gerundet, so daß bei geschlossener Trenn-

wand die in den Kammern befindlichen Platten gegeneinander keine Kapazität haben. 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 0,05 bis 1 pF, im größten Meßbereich Kapazitäten bis 100 pF zu messen.

Zusammenfassend läßt sich sagen, daß die Brückenordnungen die einfachsten und genauesten Meßverfahren für die Untersuchung von Isolierstoffen sind. Abschirmung und bifilare Leitungsführung sind die Geheimnisse dieser Meßkunst.

**Schreibende Meßgeräte für Isolierstoff-Untersuchungen.** Der Wunsch nach schnellen Meßverfahren in Prüffeld und Laboratorium hat die Ent-

<sup>1</sup> ZICKNER, G.: Elektr. Nachr. Techn. Bd. 7 (1930) S. 443.

wicklung von Brücken mit direkter Ablesung und der Möglichkeit zur Aufzeichnung der Meßergebnisse veranlaßt. Diese Brücken sind zunächst für technische Frequenzen, d. h. hauptsächlich 50 Hz entwickelt.

Das Ziel war dabei, 1. auch für höhere Spannungen am Prüfling eine möglichst kleine, tragbare Versuchsanordnung zu schaffen, 2.  $\operatorname{tg} \delta$ , die Kapazität oder die Verlustleistung direkt aufzuschreiben und diese graphische Aufzeichnung in Abhängigkeit von der Temperatur oder der Spannung vorzunehmen, 3. die selbsttätige Einstellung des Brückengewichtes zu erreichen.

Die Aufgaben wurden lösbar, nachdem es gelungen war, mechanische Gleichrichter genügender Präzision zur Messung von Wechselströmen mit Gleichstrominstrumenten zu bauen. Durch die Entwicklung der sog. Schwingkontaktgleichrichter<sup>1</sup>, deren Hauptkennzeichen die Verwendung sehr kleiner Kontaktwege und die Vermeidung von Induktionsströmen in der schwingenden Zunge

sind, ist dies ermöglicht. Mittels in den Erregerkreis eingeschalteter Phasenschieber kann der Phasenunterschied zwischen Erregerstrom und gleichzurichtendem Strom beliebig eingestellt werden. Die Verwendung der Gleichrichter in der Brückendiagonale vor einem Drehspulgalvanometer gestattet, den Nullstrom der Brücke entsprechend dem Blindstrom und dem Verluststrom nach zwei zueinander senkrechten Stromvektoren abzugleichen und die Abgleichung für die Kapazität und für  $\operatorname{tg} \delta$  je nach der Erregung der Schwingkontaktgleichrichter getrennt vorzunehmen. Das Schaltungsschema zeigt die Abb. 66. Führt man den Strom über einen Verstärker einem Registrierinstrument zu, so ist in dieser Anordnung die Aufnahme der Änderung der Kapazität und des Verlustfaktors nach einem Brückenausschlagverfahren möglich<sup>2</sup>. Das regelbare Kapazitätsnormal wird auf der Niederspannungsseite eines Hochspannungswandlers an die Brücke angeschlossen. In Reihe mit dem Normalkondensator liegen veränderbare Widerstände, um die Brücke auf den Verlustfaktor abgleichen zu können. Als Normalkondensator dient ein verlustfreier Drehkondensator. Ein Nachteil dieser Brücke ist, daß sie vorwiegend für kleine Kapazitäten entwickelt wurde, und daß das Meßergebnis durch die Verwendung der Schwingkontaktgleichrichter von der Kurvenform abhängig ist.

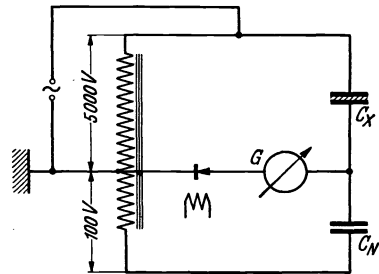


Abb. 66. Brückenordnung mit Gleichrichter und Galvanometer im Mittelzweig.

<sup>1</sup> KRÖNERT, J.: Z. techn. Physik, Bd. 14 (1933) S. 474.

<sup>2</sup> KEINATH: ATM V 339—11 u. 13.





(Abb. 68). Für die Kompensation benutzt man ein gewöhnliches Induktionsmeßwerk, das die Eigenschaften eines phasenabhängigen Nullindikators besitzt und außerdem als Umkehrmotor zur Steuerung der gebräuchlichen Abgleichmittel, nämlich der Drehung eines Schleifkontaktes, benutzt werden kann. Zur Abgleichung sowohl der Kapazität wie des Verlustfaktors benötigt man je ein fremderregtes Zählermeßwerk. Die zwei Meßwerke müssen zur Erzielung ausreichender Empfindlichkeit über einen gemeinsamen Röhrenverstärker verbunden werden. Die beweglichen Glieder der Abgleichwiderstände, die Schleifkontakte, sind entweder mit den Zeigern von Anzeigeeinstrumenten oder mit Tinten-

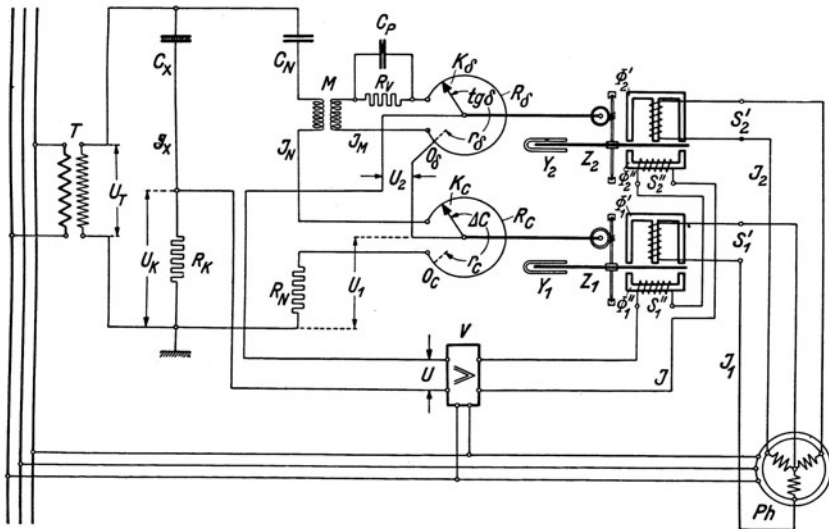


Abb. 68. Brückenordnung für Verlustmessung mit selbsttätigem Abgleich.

schreibern mechanisch gekuppelt. Bei richtiger Phaseinstellung der Erregerfelder der Nullindikatoren besteht ein eindeutiger Zusammenhang zwischen der Drehrichtung der Zählerscheiben und der zum konvergenten Abgleich notwendigen Drehung der Schleifkontakte  $R_\delta$  und  $R_C$  in der Weise, daß die Beeinflussung der Kompensationskontakte für den Abgriff der Kompensationsspannungen für  $\Delta C_X$  und  $\delta$  im Sinne der gewünschten Brückeneinstellung erfolgt. Der Betrieb dieser Brücken geht mithin so vor sich, daß die Anordnung zunächst hinsichtlich der Kapazitäten von Hand durch den Widerstand  $R_K$  so abgeglichen wird, daß der Schleifkontakt für die kapazitive Spannungskomponente auf den Punkt Null des Schleifdrahts  $\Delta C_X$  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  $\text{tg } \delta$ , 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 Kapazitätsänderung und des Verlustfaktors. Die Einstellzeit der Schreibfedern beträgt etwa 1—2 s. Diese voll selbsttätige Abgleichung von Verlustwinkelbrücken dürfte für die laufende Prüfung von Isolierstoffen wie auch von Kapazitäten, Kabeln und Hochspannungsapparaten große Bedeutung haben.

**Schreibende Leistungsmesser.** Statt der Größen  $\operatorname{tg} \delta$  und  $C$  bzw.  $\Delta C$ , die einen Anhaltspunkt über die elektrische Güte der Isolierstoffe bieten, kann man auch die von dem Isolierstoff in einem Wechselfelde aufge-

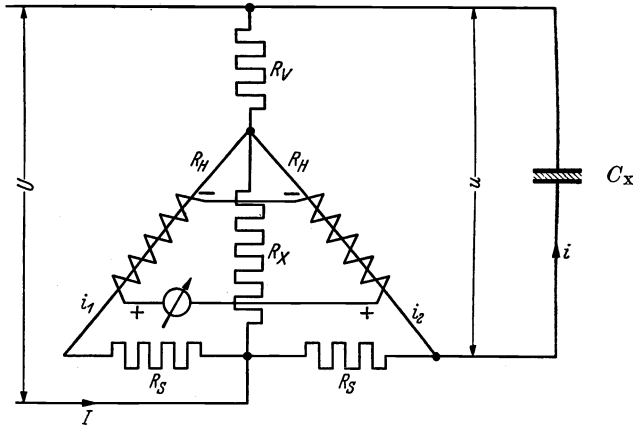


Abb. 69. Fehlerfreier thermischer Leistungsmesser.

nommene Wirk- oder Verlustleistung messen. Die Wirkleistung ist gegeben als  $N = U^2 \omega C \cdot \operatorname{tg} \delta$ , wobei  $U$  die Spannung am Kondensator  $C$  und  $\omega$  die Kreisfrequenz bedeuten. Die Aufzeichnung der Verlustleistung ist durch das thermische Wattmeter<sup>1</sup> möglich. Dieses interessante Meßgerät ist sehr empfindlich, so daß noch  $1/1000$  Watt bei  $\operatorname{tg} \delta = 3 \cdot 10^{-4}$  mit guter Genauigkeit gemessen und aufgezeichnet werden kann. Das Schaltungsschema des Geräts ist in der Abb. 69 gezeichnet.  $R_H$  sind zwei Heizwiderstände, um die herum je eine Reihe von Thermoelementen in genau gleicher Weise und gleicher Anzahl angebracht ist. Beide Reihen sind über ein empfindliches Galvanometer gegeneinander geschaltet. Zunächst sei gezeigt, inwiefern das Instrument überhaupt zur Leistungsmessung dienen kann. Es wird angenommen, daß kein Verbraucher angeschlossen ist, dann verzweigt sich der Strom  $I$  in

<sup>1</sup> ZICKNER u. PFESTORF: ETZ Bd. 51 (1930) S. 1681.

zwei gleiche Teilströme  $i_1$  und  $i_2$ , die zuerst je einen Widerstand  $R_s$  und darauf einen Heizwiderstand  $R_H$  durchfließen, sich alsdann wieder vereinigen und gemeinsam den Vorwiderstand  $R_V$  durchfließen. Die beiden Heizwiderstände  $R_H$  werden somit von gleichen Strömen durchflossen; in beiden Serien von Thermoelementen entsteht die gleiche EMK. Da jedoch die Reihen gegeneinandergeschaltet sind, zeigt das Galvanometer keinen Ausschlag. Sobald ein Verbraucher angeschlossen ist, also z. B. durch den Kondensator  $C_X$  Strom fließt, wird das Gleichgewicht gestört, und das Galvanometer schlägt aus. Dieser Ausschlag ist proportional der Differenz der Wärmewirkungen beider Heizdrähte. Da die entwickelte Wärmemenge ihrerseits proportional  $i_1^2$  bzw.  $i_2^2$  ist, so besteht zwischen der Angabe des Instrumentes  $\alpha$  und den Heizströmen folgende Beziehung:

$$\alpha = C \cdot R_H (i_1^2 - i_2^2),$$

wobei  $C$  eine Konstante bedeutet.

Durch Anwendung der KIRCHHOFFSchen Regeln auf die Verzweigungen, zunächst ohne Berücksichtigung des Widerstandes  $R_X$ , erhält man die genauen Werte für  $i_1$  und  $i_2$  in Abhängigkeit von  $u$  und  $i$ . Für den Ausschlag  $\alpha$  findet man, daß er proportional  $ui \cos \varphi$ , d. h. proportional der Verlustleistung im Isolierstoff ist. Jedoch tritt noch ein Fehlerglied  $i^2 k$  auf, das die Leistungsmessungen unter besonders ungünstigen Verhältnissen bis etwa 30% fälschen kann. In dieser Form ohne den Widerstand  $R_X$  war das Gerät mithin nicht brauchbar. Erst die Entwicklung der Schaltung nach BADER<sup>1</sup> mit dem Widerstand  $R_X = R_V \frac{R_H + R_S}{R_H}$  hat das Gerät brauchbar gemacht. Die Anordnung geht auf eine Schaltung zurück, die BADER<sup>2</sup> für die gleichzeitige fehlerlose Strom- und Spannungsmessung entwickelt hat. Bei gleichzeitiger Strom- und Spannungsmessung muß, je nachdem, ob sich der Strommesser vor oder hinter dem Spannungsmesser befindet, der Spannungsabfall am Strommesser oder der Stromverbrauch des Spannungsmessers berücksichtigt werden. Bei dem thermischen Leistungsmesser entsprach das Korrekturglied  $i^2 k$  sozusagen dem Eigenverbrauch des thermischen Leistungsmessers. Mit der neuen Schaltung wurde ein thermischer Leistungsmesser gewonnen, der fehlerfrei die kleinsten Wirkströme in Abhängigkeit von Zeit, Spannung, Temperatur usw. anzeigt. Die Aufzeichnung ist durch Verwendung eines Spiegelgalvanometers mit Lichtzeiger leicht möglich. Ein besonderer Vorteil des thermischen Leistungsmessers ist zum Schluß noch zu erwähnen: Er ist praktisch in weitem Bereich frequenzunabhängig.

<sup>1</sup> BADER: Arch. Elektrotechn. Bd. 29 (1935) S. 809.

<sup>2</sup> BADER: ETZ Bd. 56 (1935) S. 889.

### Einige Sonderanforderungen.

**Messungen bei Hochfrequenz.** Die Messung der Kapazität und des Verlustfaktors bei Hochfrequenz<sup>1</sup> wird schwierig, weil in den üblichen Brückenanordnungen die Kapazitäten der Widerstände und der Abschirmungen sowie störende Selbstinduktionen der Leitungen erhebliche Fehler bedingen. In der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt wird für den Fall der Messung mit einer Million Hz und darüber eine Brückeneinrichtung angewandt, die bei Verwendung des bekannten 3-Plattenkondensators die Messung der Dielektrizitätskonstanten und des Verlustfaktors von Isolierstoffen gestattet. Voraussetzung ist dabei, daß die Kapazität der Prüflinge in einem bestimmten Bereich liegt, so daß mitunter eine Vorausbestimmung der Dielektrizitätskonstanten bei 50 Hz und angenäherte Berechnung der Elektrodenbelegungen erforderlich ist.

Ein anderes Verfahren zur Ermittlung der isolierenden Eigenschaften der Werkstoffe bei Hochfrequenz beruht auf der Dämpfungsmessung im Resonanzkreis mittels Zusatzwiderständen<sup>2</sup>. Zwischen die Platten eines Kondensators wird der zu untersuchende Isolierstoff gebracht und der Widerstand des Schwingungskreises einmal mit verlustbehaftetem Kondensator, sodann mit verlustlosem Kondensator ermittelt. Die Differenz der Widerstände ist der gesuchte Verlustwiderstand  $R_V$ , der in Reihe mit einem verlustlosen Kondensator gleicher Größe den Verlustfaktor  $\operatorname{tg} \delta = R_V \omega C$  hervorruft. Auch diese Verfahren sind so durchgebildet, daß Schnellmessungen an Isolierstoffproben leicht möglich sind. Messungen bei Hochfrequenz werden wie die übrigen in Abhängigkeit von der Temperatur und der Frequenz ausgeführt<sup>3</sup>. Auch die in dem Kondensator beim Stromdurchgang in einer bestimmten Zeit entwickelte Wärme ist zur Messung des dielektrischen Verlustfaktors herangezogen worden<sup>4</sup>.

**Tropensicherheit.** Von Bedeutung für die Isolierstofftechnik ist die Prüfung von Isolierstoffen auf ihre Tropensicherheit. Der Begriff der Tropensicherheit ist freilich noch nicht eindeutig festgelegt (vgl. S. 183). Man versteht darunter 1. die Beeinflussung der Werkstoffe durch erhöhte Temperatur, hohe Luftfeuchtigkeit und starke, gleichzeitige Schwankungen beider Größen; 2. den Einfluß starker Sonnenbestrahlung, gegebenenfalls die Einwirkung von Ozon und 3. die Wirkung von Staub, Pilzen, Insekten und anderes. Auch für den 1. Fall, Beanspruchung durch hohe Temperatur und Feuchtigkeit liegen keine endgültigen Prüfverfahren fest. Um Anhaltspunkte über das Verhalten von Isolierstoffen unter derartigen Verhältnissen zu gewinnen, ist die Durchführung von

<sup>1</sup> HARTSHORN, L. u. W. H. WARD: J. Instn. electr. Engr. Bd. 79 (1936) S. 597.

<sup>2</sup> PAULI, H.: Z. Telegr. u. Teleph. Bd. 18 (1921) S. 338. — ROHDE und SCHLEGELMILCH: ETZ Bd. 54 (1933) S. 581.

<sup>3</sup> STRAIMER u. ZINKE: ATM Z 940—2.

<sup>4</sup> SCHMELZER, CH.: Physik. Z. Bd. 37 (1936) S. 162.

Messungen in einem sog. Klimaschrank notwendig. Er gestattet die Einstellung bestimmter Luftfeuchtigkeiten bei Temperaturen bis zu etwa  $+60^{\circ}$ . Die Erzeugung der gewünschten Atmosphäre kann dabei nach der von BONGARDS<sup>1</sup> angegebenen Weise geschehen. Durch ein Gebläse wird Luft aus dem Klimaraum durch einen Standzylinder gedrückt, der mit Schwefelsäure einer bestimmten Dichte gefüllt ist. Entsprechend der Dichte der Schwefelsäure wird die Luft eine bestimmte relative Luftfeuchtigkeit annehmen und in den Klimaraum strömen. Änderungen der Luftfeuchtigkeit können durch Einschaltung anderer Standzylinder in den Luftumwälzweg erreicht werden. Luftfeuchtigkeit und Temperatur, die selbsttätig geregelt werden, läßt man durch einen Hygrographen bzw. Thermographen aufzeichnen. Für den Fall, daß eine unerwünschte Änderung der Feuchtigkeit im Schrank eintritt, wird durch ein Hygrometer eine Relaiseinrichtung ausgelöst, die optisch oder akustisch auf die Änderung aufmerksam macht.

Wie wichtig Untersuchungen bei wechselnden Luftfeuchtigkeiten und bei verschiedenen Temperaturen allgemein für die Meßtechnik sind, ist bekannt. Wenn z. B. Hochohmwiderstände sich in einem künstlichen Tropenklima um 10% ihres Wertes ändern, so ist das für die heutige Technik untragbar. Und es ist erfreulich, daß die Anwendung der neuen Prüfverfahren bereits zur Entwicklung von Konstruktionen geführt hat, die als praktisch unveränderlich anzusprechen sind.

Den klimatischen Verhältnissen in unseren Breitegraden trägt man dadurch Rechnung, daß für die Prüfung von Isolierstoffen eine viertägige Lagerung in einem Raum von 80% relativer Luftfeuchtigkeit oder eine Wasserlagerung vorgesehen ist. Manchen Fachleuten erscheint die Prüfung bei 80% nicht ausreichend, da in Küstengegenden und unter besonders ungünstigen Bedingungen mit noch höheren relativen Feuchtigkeiten und längeren Beanspruchungszeiten zu rechnen ist.

**Kriechstromfestigkeit.** Gewisse Isolierstoffe, die aus Phenolharz mit organischen Füllstoffen bestehen, erleiden an ihrer Oberfläche unter der Einwirkung eines elektrischen Funkens Veränderungen, die zur Entstehung eines leitenden Kriechweges und zur Einleitung eines Kurzschlusses führen können. Es ist jedoch bekannt, daß die Entstehung derartiger Kriechwege infolge elektrischer Funkenbildung durch die Konstruktion der Geräte praktisch unmöglich gemacht werden kann (vgl. S. 208). Für den Techniker und Ingenieur besteht die Aufgabe, ein Verfahren zu entwickeln, das die sichere Unterscheidung 1. der Isolierstoffe und 2. der daraus hergestellten Geräte in bezug auf ihre Kriechstromsicherheit ermöglicht. Es ist hierbei die Beanspruchung der Isolierstoffe, denen sie im Laufe von Jahrzehnten unter ungünstigsten Verhält-

---

<sup>1</sup> EBERT, H.: Z. Instrumentenkde. Bd. 50 (1930) S. 55.

nissen unterworfen sind, durch eine verschärfte, abgekürzte Prüfung im Laboratorium zu ersetzen, und die Neigung gewisser Isolierstoffe zur Bildung eines Kriechweges durch ein Prüfverfahren zahlenmäßig zu erfassen. Man wird zugeben müssen, daß die Entwicklung eines der Praxis entsprechenden Verfahrens nicht einfach ist. Im folgenden seien kurz verschiedene Prüfvorschläge erörtert.

1. In England wird zwischen zwei Isolierstoffplatten ein dünner Draht gepreßt und mit den Klemmen einer Wechselspannungsquelle verbunden. Die Stromstärke wird rasch so gesteigert, daß ein Schmelzen des Drahtes eintritt. Darauf wird ein neuer Draht eingesetzt und dies Verfahren so lange wiederholt, bis infolge der zahlreichen thermischen Beanspruchungen auf der Oberfläche des Isolierstoffes sich eine leitende Brücke bildet, die einen dauernden Kurzschluß bewirkt. Die Anzahl der notwendigen Abschmelzungen bildet das Maß für die Kriechstromfestigkeit.

2. In Amerika<sup>1</sup> werden zwei Elektroden aus Wolfram in einer Entfernung von 0,8 cm auf den Isolierstoff unter 45° aufgesetzt und zwischen den beiden Elektroden Funkenüberschläge bei 60 Hz hervorgerufen. Die Dauer und die Funkenfolge werden nach einem genau festgelegten Plan so lange wiederholt, bis der Funkenüberschlag nicht mehr in Luft, sondern durch den nunmehr leitenden Isolierstoff erfolgt. Die Anzahl der Funkenüberschläge bzw. die Dauer des Versuchs bildet hier das Maß für die Kriechstromsicherheit. Es ist einleuchtend, daß dieses Verfahren mehr oder weniger gleichzeitig die Eigenschaft der Lichtbogensicherheit erfaßt. Es kann deshalb auch für die Prüfung keramischer Proben angewandt werden, die an sich als kriechstromsicher anzusprechen sind.

3. In Deutschland hat man versucht, für Niederspannungs-Installationsgegenstände die jahrelange Beanspruchung der Isolierstoffoberfläche durch Staub, Feuchtigkeit und elektrische Spannung im Laboratorium durch Benetzung mit einem Elektrolyten bei gleichzeitiger erhöhter Spannungsbeanspruchung nachzuahmen. Auf die waagerechte ebene Isolatoroberfläche werden zwei schneidenförmige Elektroden von 5 mm Breite in 5 mm Abstand voneinander aufgesetzt. Zwischen die Elektroden wird eine Wechselspannung von 300 V bei 50 Hz gelegt und der Strom durch einen Vorwiderstand im Kreis auf 5 A im Falle eines Kurzschlusses begrenzt. Aus einer Tropfflasche bringt man sodann einen Tropfen einer wäßrigen Lösung von 1 % Methylhexalin, 1 % Kaolin und 1 % Kochsalz. Methylhexalin dient hierbei als Netzmittel zur sicheren Befeuchtung der Oberfläche, das Kochsalz zur Erhöhung der elektrischen Leitfähigkeit der Lösung und Kaolin zur Nachahmung des Staubbneisenschlags der Praxis. Unter dem Einfluß der Spannung erwärmt sich die Lösung und verdampft zwischen den Elektroden. Nachdem der erste

---

<sup>1</sup> RACE, H. H. u. F. W. WARNER: Gen. electr. Rev. Bd. 38 (1935).

Tropfen verdampft ist, wird ein zweiter zwischen die Elektroden gebracht und dieses Verfahren solange wiederholt, bis sich zwischen den Elektroden eine leitende Brücke gebildet hat, die auch nach dem Verdampfen der Flüssigkeit leitend bleibt.

4. In der Tschechoslowakei wird das deutsche Verfahren nur mit dem Unterschied angewandt, daß statt der Methylhexalinkochsalzlösung eine 1/2 proz. Nekallösung benutzt wird. Nekal, ein Erzeugnis der I. G. Farbenindustrie, ist eine kernalkylierte Sulfosäure, die in der Textilindustrie als Netzmittel dient. Die 1/2 proz. Lösung besitzt bei 20° eine spez. Leitfähigkeit von etwa 2900  $\mu\text{S cm}^{-1}$ .

In Deutschland sollte außer der reinen Stoffeigenschaft vor allem die Kriechstromsicherheit des fertigen Gerätes, also der Konstruktion, erfaßt werden. Es wurden daher die Versuche an Fertigteilen nach folgenden Gesichtspunkten ausgeführt. Die geöffneten Gegenstände werden zunächst entfettet, und zwar in einer waschmaschinenähnlichen Trommel, in der die Gegenstände auf einem siebartigen Einsatz befestigt sind. Die Trommel ist zu etwa 1/5 mit der 70° warmen, wäßrigen Prüflösung angefüllt und läuft während einer halben Stunde langsam um. Nach der Entfettung wird der Prüfling abgeschwenkt und 30 sec ruhig gelagert. Sodann werden die Klemmen des Prüfkörpers mit der Spannungsquelle verbunden. Die Prüfspannung beträgt wie bei den Stoffproben 300 V, der Strom ist auf 5 A begrenzt. Es wird beobachtet, ob während einer Beanspruchung von 5 min zwischen den Elektroden sich ein Kriechweg bildet.

Das Verfahren hat sich zur Gewinnung eines Anhaltspunktes als brauchbar erwiesen, wenn auch die schwer zu definierende Form des Abschwenkens usw. mitunter zu Streuungen führt und besonders dann Bedenken hervorruft, wenn Konstruktionen aus zwingenden Gründen in den Abmessungen knapp gehalten sind.

**Mechanische Prüfungen.** Außer den rein elektrischen sind insbesondere die mechanischen Prüfungen für die Isolierstofftechnik von Bedeutung. Auch diese sind in den VDE-Vorschriften eingehend beschrieben. Neuerdings hat man die Prüfung von Kunststoffen auf mechanische Eigenschaften auch auf Untersuchungen in Abhängigkeit von der Temperatur, der Dauer und der Art der Beanspruchung ausgedehnt<sup>1</sup>.

Gerade bei den mechanischen Prüfungen sind für die Isolierstoffe besondere Schwierigkeiten zu überwinden, da Begriffe, die aus der Metallkunde als feststehend bekannt sind, wie z. B. Druckfestigkeit, Härte, nicht ohne weiteres auf die Isolierstoffe übertragen werden können. Durch neuere Arbeiten des Staatlichen Materialprüfungsamtes Berlin

<sup>1</sup> NITSCHKE u. SALEWSKI: Plastische Massen Bd. 6 (1936) S. 411, Bd. 7 (1937) S. 6 und 37.

werden hier notwendige Unterlagen zu Vergleichsmöglichkeiten und zur Normung geschaffen.

Während man sich bisher bei den mechanischen Untersuchungen auf statische Messungen beschränkte, erfordert die Verwendung der

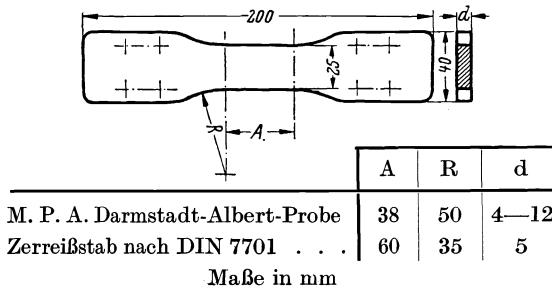


Abb.70. Probestab für Dauerbiegeversuche.

Stoffe als Baustoff die Kenntnis der sog. Dauerfestigkeit, z.B. der Biegewechselfestigkeit. Die ersten Versuchsergebnisse<sup>1</sup>, die in der Materialprüfungsanstalt der Technischen Hochschule Darmstadt zunächst an einem Preßstoff Typ S und an einem Faserpreßstoff gewonnen wurden, sind in den Zahlentafeln 2 und 3 wiedergegeben. Die statischen Meßwerte der untersuchten Stoffe sind zum Vergleich in der Zahlentafel 3 aufgeführt. Die Dauerfestigkeit wurde an Flachstben nach Abb. 70 ermittelt. Die gleiche Probenform diente auch für die Messung der statischen Eigenschaften. Bei der Angabe der Meßergebnisse in den Zahlentafeln 2 und 3 sind nur die Normalspannungen  $\sigma$  berücksichtigt. Als Dauerhaltbarkeit  $\sigma_{nwb}$  ist die Eigenschaft bezeichnet, die von der Probenform, Einkerbung usw. abhängig ist, während die Dauerfestigkeit die reine Werkstoffeigenschaft darstellt. Bei Ermittlung der Ursprungsfestigkeit  $\sigma_{urb}$  schwankte die Belastung zwischen Null und einem Höchstwert. Infolge der einseitigen Biegung ist bei der Ursprungsfestigkeit die ertragene höchste Spannung größer als bei der reinen Wechselfestigkeit.

### Thermische Eigenschaften.

**Linearer thermischer Ausdehnungskoeffizient.** Der Konstrukteur kann sich mit den elektrischen und mechanischen Eigenschaften allein nicht begnügen. Ihn interessieren die thermischen Eigenschaften genau so wie die optischen. Von den thermischen Eigenschaften ist der lineare thermische Ausdehnungskoeffizient von Bedeutung. Er spielt nicht nur in der Elektrowärmetechnik eine Rolle, sondern auch in der Hochspannungstechnik, wo Werkstoffe mit sehr geringen Ausdehnungs-

<sup>1</sup> THUM, A., A. GRETH und H. R. JACOBI in „Kunst- und Preßstoffe“, Beiheft 2, Z. VDI (1937) S. 16.



Zahlentafel 2. Dauerfestigkeit glatter Probestäbe ohne Preßhaut bei reiner Biegewechselbeanspruchung.

Die angeführte Beanspruchung bezieht sich auf den unversehrten Anfangsquerschnitt des Versuchsstabes. Wenn nichts anderes erwähnt ist, dann gilt der Stab als gebrochen, wenn er bis zur halben Querschnittshöhe eingerissen ist.

Probenbreite: 25,5 mm.

	Preßstoff- bezeichnung	Prüfquer- schnitt cm <sup>2</sup>	Bean- spruchung $\sigma_{wb}$ kg/cm <sup>2</sup>	Periodenzahl	Frequenz	Bemerkungen
				10 <sup>6</sup> N	Hz	
Faserpreßstoff	4591	2,04	385	13,500	10	<sup>1</sup>
	4591	1,79	450	1,675	10	gebrochen <sup>1</sup>
	4591	1,98	425	2,282	10	„ <sup>1</sup>
	5590	1,97	445	0,843	10	gebrochen <sup>2</sup>
	5590	2,09	400	2,619	10	„ <sup>2</sup>
	4591	1,92	360	8,873	10	„ <sup>2</sup>
Preßstoff Typ S	2015	1,81	365	0,262	10	gebrochen <sup>1</sup>
	2015	1,90	305	2,822	10	„ <sup>1</sup>
	2015	1,83	280	> 15,936	10	nicht gebrochen <sup>1</sup>
	2015	1,86	275	3,840	10	gebrochen <sup>1</sup>
	2005	1,93	305	0,074	10	gebrochen <sup>2</sup>
	2015	1,99	280	0,698	10	„ <sup>2</sup>
	2005	1,95	250	5,022	10	„ <sup>2</sup>

<sup>1</sup> Preßhaut in Richtung der Stabachse abgehobelt und Oberfläche geglättet.

<sup>2</sup> Preßhaut quer zur Stabachse abgehobelt und Oberfläche nicht geglättet.

Zahlentafel 3. Dauerfestigkeitswerte für Planbiegung von Kunstharzpreßstoffen.

Probeform			Faserpreßstoff		Typ S	
	Harzgehalt		37 bis 40%	50%	40%	50%
Glatter Stab	Dauerbiegefestigkeit $\sigma_{wb}$	kg/cm <sup>2</sup>	405 <sup>1</sup>	280 <sup>2</sup>	275 <sup>1</sup>	230 <sup>2</sup>
			360 <sup>2</sup>		255 <sup>2</sup>	
	Ursprungs- biegefestigkeit $\sigma_{Urb}$	kg/cm <sup>2</sup>	≈ 380 <sup>2 3</sup>		≈ 270 <sup>2 3</sup>	
Stab mit Bohrung	Dauerhaltbarkeit $\sigma_{nwb}$	kg/cm <sup>2</sup>	220 ± 220 <sup>2</sup>		170 ± 170 <sup>2</sup>	
Stab mit eingepreßter Kerbe	Dauerhaltbarkeit $\sigma_{nwb}$	kg/cm <sup>2</sup>	305 <sup>2</sup>		170 <sup>2</sup>	
Stab mit ein- gehobelter Kerbe	Dauerhaltbarkeit $\sigma_{nwb}$	kg/cm <sup>2</sup>	260 <sup>2</sup>		225 <sup>2</sup>	
Stab mit ein- gehobelter Kerbe	Dauerhaltbarkeit $\sigma_{nwb}$	kg/cm <sup>2</sup>	280 <sup>2</sup>		200 <sup>2</sup>	

<sup>1</sup> Grenzperiodenzahl 3 · 10<sup>6</sup>.

Grenzperiodenzahl 20 · 10<sup>6</sup>.

<sup>3</sup> Preßhaut abgehobelt, Oberfläche geglättet.

koeffizienten plötzlichen Erwärmungen durch Lichtbogenüberschläge standhalten, ohne zu springen. Die charakteristischen Werte für den linearen Wärmeausdehnungskoeffizienten einiger Isolierstoffe als Ver-

Zahlentafel 4. Physikalische Meßwerte der untersuchten Preßstoffe.

Preßstoff und Bezeichnung	Faserpreßstoff 4591	Faserpreßstoff 5590	Typ S 2005	Typ S 2015	Preßharz 7038
Füllung . . . . .	Baumwoll- faser	Holzzell- stofffaser	Holzmehl		
Harzgehalt . . . . %	37 bis 38	40	40	40	100
Zugfestigkeit . kg/cm <sup>2</sup>	770 <sup>13</sup>	900 <sup>13</sup>	410 <sup>1</sup>		600 <sup>1</sup>
Druckfestigkeit kg/cm <sup>2</sup>	1300 <sup>23</sup> 2800 <sup>24</sup>	1350 <sup>23</sup> 2800 <sup>24</sup>	2550 <sup>2</sup>		2800 <sup>2</sup>
Biegefestigkeit kg/cm <sup>2</sup>	1150 <sup>1</sup> 1450 <sup>5</sup>	1320 <sup>1</sup> 1585 <sup>5</sup>	750 <sup>1</sup> 800 <sup>5</sup>		1040 <sup>1</sup> 1050 <sup>5</sup>
Kugeldruckhärte nach DIN 7701 . . kg/cm <sup>2</sup>	2200 <sup>6</sup> 2140 <sup>7</sup>	2420 <sup>6</sup> 2350 <sup>7</sup>	2270 <sup>6</sup> 2200 <sup>7</sup>		2470 <sup>6</sup> 2420 <sup>7</sup>
Elastizitätsmodul <sup>8</sup> kg/cm <sup>2</sup>	1,36 · 10 <sup>7</sup> <sup>3)</sup>	1,00 · 10 <sup>7</sup> <sup>3)</sup>	0,75 · 10 <sup>7</sup>		0,61 · 10 <sup>7</sup>
Schlagbiegefestigkeit <sup>5</sup> cmkg/cm <sup>2</sup>	23	23	6,5		11
Glutfestigkeit . . . .	Vergleichszahl 3 nach VDE 0305				
Wärmefestigkeit <sup>5</sup> . . °C	172	133	128 bis 135		≈130
Lineare Wärmedehn- zahl <sup>8</sup> zwischen -10°C und +50°C	15 · 10 <sup>-6</sup>	24 · 10 <sup>-6</sup>	38 · 10 <sup>-6</sup>		45 · 10 <sup>-6</sup>
Spezifisches Gewicht .	≈1,4		1,37		1,27
Farbe . . . . .	naturfarben (hellbraun)	naturfarben (dunkelbraun)	schwarz	braun- schwarz	himbeerrot

<sup>1</sup> Dauerbiegestab.

<sup>5</sup> Nach VDE 0302, Normalstab 120 mm × 15 mm × 10 mm.

<sup>2</sup> Würfel von 10 mm Kantenlänge.

<sup>6</sup> Nach 10 s Eindruckzeit.

<sup>3</sup> || = zur Faser.

<sup>7</sup> Nach 60 s Eindruckzeit.

<sup>4</sup> ⊥ = zur Faser.

<sup>8</sup> Prüfstab 120 mm × 15 mm × 5 mm.

treter gewisser Stoffgruppen sind in der Zahlentafel 8 (S. 119) und am Schlusse des Buches zusammengestellt.

Für den Bau von Präzisionsinstrumenten, z. B. Meßgeräten, Kondensatoren sind diese Zahlen von Bedeutung.

**Thermische Leitfähigkeit.** Auch die Wärmeleitfähigkeit der Isolierstoffe ist von Wichtigkeit. Besonders gilt dies für Zündkerzen der Verbrennungsmotoren und für Isolatoren in Gasreinigungsanlagen, die hohen Temperaturen ausgesetzt sind. Hier ist bei guter Wärmeleitfähigkeit ein rascher Temperatenausgleich möglich, eine schnelle Wärmeableitung erwünscht. Wie aus den Zahlentafeln S. 119 und 204 hervorgeht, ist der Unterschied der Wärmeleitfähigkeit der Isolierstoffe einer Gruppe nicht sehr groß.

Eins der Ziele der Isolierstofftechnik ist die Entwicklung von Werkstoffen, die bei guter Isolation ein gutes Wärmeleitvermögen besitzen. In dem Quarz und dem Sinterkorund, dem geschmolzenen Aluminiumoxyd, hat man Werkstoffe, die dieser Bedingung entsprechen. Die Erhöhung der Wärmeleitfähigkeit guter Isolierstoffe durch Zusätze von Quarzpulver<sup>1</sup> ist meist mit Rücksicht auf die anderen Eigenschaften begrenzt (vgl. S. 204).

**Wärmefestigkeit.** Um einen Anhaltspunkt darüber zu gewinnen, bei welchen Temperaturen unter der mechanischen Biegebeanspruchung von 50 kg/cm<sup>2</sup> eine Verformung der Isolierpreßstoffe auftritt, wendet man die sog. Martensprüfung an, das ist eine mechanische, statische Belastung in Abhängigkeit von der Temperatur, und gibt die °C an, bei denen eine bestimmte Biegung der Probestäbe erfolgt. Die englische Prüfung auf „Plasticity“ entspricht ungefähr dieser Prüfung und die Martensgrade mithin etwa dem sog. „Yield Point“, wenn auch die Verfahren, nach denen die Werte ermittelt werden, voneinander ein wenig abweichen.

**Dauerwärmeständigkeit.** Bei den organischen Isolierstoffen interessieren die Temperaturen, welche dauernd von dem Werkstoff ohne Schädigung vertragen werden. Die üblichen Prüfverfahren zur Beurteilung des thermischen Verhaltens von Preßstoffen lassen hier nur ein Urteil über das Verhalten bei kurzfristigen, nicht aber bei langfristigen Beanspruchungen zu. Es sind deshalb an den typisierten Isolierpreßstoffen Untersuchungen<sup>2</sup> auf Biegefestigkeit, Schlagbiegefestigkeit, Wärmefestigkeit, Glutfestigkeit, Oberflächenwiderstand und Schrumpfung ausgeführt worden, nachdem Normalstäbe bis zu 400 Stunden bei 100°, 125°, 150° und 200° gelagert waren. Will man zu einer Festlegung der „Dauerwärmeständigkeit“ in °C schreiten derart, daß bei der für den Stoff zulässigen Höchsttemperatur nach 200 Stunden die Biege- und Schlagbiegefestigkeiten höchstens 10% gegenüber den Anfangswerten absinken dürfen, die Schrumpfung höchstens 0,6% betragen darf und eine Wasseraufnahme von 10% zugelassen wird, so ergeben sich für die Isolierstoffe die folgenden Werte (s. Zahlentafel 4).

<sup>1</sup> MEISSNER, A.: ETZ Bd. 55 (1934) S. 1193.

<sup>2</sup> NITSCHKE u. SALEWSKI: Plastische Massen Bd. 6 (1936) S. 411, Bd. 7 (1937) S. 6 u. 37.

Man erhält also jeweils eine andere Höchsttemperatur entsprechend den Eigenschaften, die man definitionsgemäß zugrunde legt.

Zahlentafel 5.

Typ	Dauerwärmebeständigkeit in °C bei Berücksichtigung der			
	Biege- festigkeit	Schlar- biegefestig- keit	Wasser- aufnahme	Schrump- fung
S	135	130	130	130
T	95	125	etwa 80	etwa 165
I	215	215	120	200
K	90	90	—	etwa 80

### Prüfung von nicht-keramischen Isolierpreßmassen.

Wenn in den vorangehenden Abschnitten Prüfverfahren beschrieben sind, die allgemein auf Isolierstoffe Anwendung finden müssen, so ist der Vollständigkeit

halber zu erwähnen, daß die Preßmassen, die zur Herstellung von Isolierpreßstoffen dienen, noch Prüfungen<sup>1</sup> des Fließvermögens, der Härtegeschwindigkeit und des Härtegrades erfordern. Hierfür werden von den einzelnen Herstellern verschiedene in der Praxis entwickelte Geräte benutzt. Vorschläge zur Festlegung von einheitlichen Prüfverfahren sollen demnächst veröffentlicht werden.

Das Eindringen der Werkstoffe auf Kunststoffbarzbasis in den Maschinenbau, in Gebiete, die bisher fast ausschließlich den Metallen vorbehalten waren, z. B. den Lager- und Zahnradbau, erfordert wiederum ganz neuartige Versuchs- und Meßeinrichtungen<sup>2</sup>, auf die hier nicht eingegangen werden kann.

**Korrosion.** Von Bedeutung für die Verwendung der Isolierstoffe in der Praxis ist die Frage nach der Korrosionsfestigkeit<sup>3</sup>. Isolierstoffe, die chemisch unbeständig sind oder bei den Betriebstemperaturen Angriffe auf Metallen hervorrufen, sind als ungeeignet zu bezeichnen. Bei diesen Untersuchungen, für die Prüfvorschläge nicht festliegen, ist jedoch darauf zu achten, ob es sich um Korrosionen handelt, die durch den Isolierstoff oder durch die in Spalten oder Haarrissen absorbierte Feuchtigkeit bedingt sind.

## II. Ergebnisse aus der Isolierstofftechnik.

Wenn die Überschrift des zweiten Teiles zum Vortrag lautet: Ergebnisse aus der Isolierstofftechnik, so kann sich dieser wiederum nur auf einzelne, ausgewählte Kapitel beschränken. Der Physiker wird sich für die molekularen Vorgänge und ihre Zusammenhänge, der Techniker mehr für die zahlenmäßige Durchdringung der Materie und für Modell-

<sup>1</sup> BRANDENBURGER, K.: Kunststoffe Bd. 26 (1936) S. 126.

<sup>2</sup> BOLLER: Bull. Schweiz. Elektrot. Ver. Bd. 27 (1936) S. 281.

<sup>3</sup> WALLICHS, S. u. G. DEPIEREUX: Masch.-Bau, Betrieb Bd. 15 (1936) S. 393.

versuche interessieren. Es sei versucht, durch einige Beispiele beiden Wünschen gerecht zu werden. Über die physikalischen Zusammenhänge bei den keramischen Werkstoffen und den Gläsern haben wir im ersten Vortrag (S. 1—54), über die Kunststoffe im zweiten Vortrag (S. 61—82) bereits die wichtigsten Ergebnisse gehört.

Die richtige Anwendung der Prüfverfahren hat dazu beigetragen, daß 1. die Isolierstoffe nur da gebraucht werden, wo sie auf Grund ihrer Eigenschaften am Platze sind; 2. Verbesserungen der Isolierstoffe angestrebt und für besondere Verwendungszwecke Stoffe mit entsprechenden Eigenschaften entwickelt wurden. Die laufende Prüfung aller Stoffeigenschaften hat zusammen mit dem gewaltigen Fortschritt der Meßtechnik in den letzten Jahren wesentlich bei der Entwicklung der Vielzahl von Isolierstoffen mitgewirkt.

Die Porzellane sind in fünf große Gruppen einzuteilen (vgl. S. 122 ff.), bei den Kunststoffen ist eine gewisse Einteilung durch die sog. Typisierung umrissen (vgl. S. 69), im ganzen ist aber die Entwicklung hier noch gar nicht abzusehen. Auch bei den natürlichen Isolierstoffen ist eine zunehmende Verbesserung und Veredelung durch die Verarbeitung festzustellen.

**Erkennung von Kunststoffgruppen.** Alle Stoffe, die für ihre Verwendung die Möglichkeit einer Mischung zulassen, bieten dadurch den Ausgangspunkt zu Werkstoffen mit anderen Eigenschaften. Je nach den Füllstoffen und dem Weichmacher werden Erzeugnisse gewonnen, die z. B. in ihren Eigenschaften dem Blei oder dem Weichgummi nahekommen. Da noch schneller als die Herstellung der Kunststoffe die Erfindung neuer Namen für die Erzeugnisse möglich ist, wird eine Orientierung auf dem Kunststoffmarkt<sup>1</sup> für den Laien nur unter Berücksichtigung der großen Gruppen möglich. Aus dem Aussehen der Fertigstücke ist nicht ohne weiteres zu erkennen, um welchen Isolierstofftyp es sich handelt. Eine Prüfung mit der Bunsenflamme gibt einen ungefähren Anhaltspunkt über die Gruppe, zu der der Stoff gehört, vgl. die Übersicht S. 104.

**Elektrische Eigenschaften und Molekülbau.** Außer der Einteilung der Stoffe nach sinnfälligen Eigenschaften hat der Physiker das Streben nach Erkenntnis der Zusammenhänge zwischen den Eigenschaften und dem Molekülaufbau. Auch hier haben die elektrischen Prüfverfahren Aufklärung über manche Vorgänge im Innern gebracht. Andere Fragen haben auf Grund von physikalischen Vorstellungen über den Atom- und Molekülbau erklärt werden können. Wichtige Einzelheiten über die Kristallstruktur der keramischen Stoffe und Gläser sind im ersten Vortrag

---

<sup>1</sup> PABST, F.: Kunststoff-Taschenbuch, 2. Aufl. Berlin 1937. K. BRANDENBURGER: Die Kunststoffauswahl, Leipzig 1937.

## Prüfung mit der Bunsenflamme.

Sorte	Brennbarkeit	Geruch	Aussehen der Asche
Zement und . . . . Wasserglas	brennt nicht	kein Geruch	—
Schwarzes . . . . Phenolharz	kohlt und brennt	nach Phenol	leicht braun
Schwarzes Kresolharz . . . .	kohlt und brennt	nach Phenol	körnig schwarz
Harnstoffharz . . . .	Flamme erlischt	stechend unange- nehm	—
Gummimischungen. Pechmischung . . . .	gelbe Flamme schmilzt u. brennt	nach Gummi nach Teer	— —
Natürliches Harz . . . .	brennt leicht	nach Siegellack	—
Kasein . . . . .	brennt langsam	nach Käse	—
Zelluloseazetat . . . .	brennt mit rußen- der Flamme	nach Kohle	—
Zelluloid . . . . .	verpufft	nach Kampfer	—
Vinylharz . . . . .	brennt schwer mit gelber Flamme	nach Essigsäure	—
Methylester . . . . .	brennt schwer mit gelber Flamme	nach Fruchtesenz	—

(S. 25), über den chemischen Aufbau der Kunststoffe im zweiten Vortrag (S. 70) enthalten.

**Gleichstromleitfähigkeit.** Die Annahme, daß wir es bei der Leitfähigkeit der Isolierstoffe fast vorwiegend mit Ionenleitfähigkeit zu tun haben, ist unbestritten. Der Ionentransport ist die bekannte Ursache der elektrischen Korrosionsschäden und ist auch dort nachzuweisen, wo eine Ionenleitung bisher als nicht wahrscheinlich angenommen wurde. Der Ionenleitfähigkeit sind die bekannten elektrischen Ladungserscheinungen überlagert, die zu der Annahme der elektrischen Dipole führten.

Die Gleichstromleitfähigkeit nimmt im allgemeinen mit steigender Temperatur zu. An Paraffinen hat man jedoch bei etwa  $10^{\circ}$  unterhalb des Schmelzpunktes einen negativen Temperaturkoeffizienten<sup>1</sup> festgestellt, während bei den entsprechenden dielektrischen Verlustwinkelmessungen ein normaler Kurvenverlauf beobachtet wird. Nach GEMANT<sup>2</sup> deutet diese Tatsache darauf hin, daß mit abnehmender Temperatur ein Übergang aus dem glasigen in den kristallinen Zustand stattfindet. Wenn diese Annahme richtig ist, werden sich aus den Leitfähigkeitskurven die Schmelzpunkte bzw. die Anteile an kristallinen Körpern mit bekanntem Schmelzpunkt errechnen lassen. Außerdem würde folgen, daß die Ur-

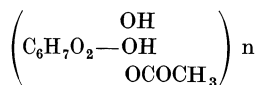
<sup>1</sup> JACKSON, W.: Trans. Faraday Soc. Bd. 31 (1935) S. 827; Nature, Lond. Bd. 133 (1934) S. 647.

<sup>2</sup> GEMANT: Nature, Lond. Bd. 135 (1935) S. 912.

sachen der Gleich- und der Wechselstromleitfähigkeit unter Umständen voneinander verschieden sein können.

Bei den Gläsern bewirkt ein Zusatz von Alkaliionen eine Erhöhung der Leitfähigkeit; entsprechend besitzen Gläser mit ZnO, MgO, PbO, BaO und CaO eine geringe Leitfähigkeit<sup>1</sup>. Die Ursache liegt in der Ionengröße; während die Alkaliionen verhältnismäßig leicht im Molekül aufgenommen werden, ist dies bei den größeren Atomen nur schwer der Fall. Immerhin sind die Ergebnisse der Arbeiten über die Leitfähigkeit der Gläser umstritten. Gewisse Widersprüche werden auf die Entstehung von hochisolierenden Schichten zurückgeführt, die sich in unmittelbarer Nähe der Elektroden bilden sollen<sup>2</sup>.

Wichtig ist die Gleichstromleitfähigkeit bei all den Stoffen, die zur Wasseraufnahme neigen, z.B. Fasern. Bei der Zellulosefaser wird ein Teil des Wassers von den OH-Gruppen der Zellulosemoleküle absorbiert. Dieser Vorgang ist reversibel. Ein anderer Teil wird jedoch durch die Kapillarkräfte der Faser aufgespeichert. Beide verursachen eine unerwünschte Gleichstromleitfähigkeit. Das Ziel ist daher 1. nach Trocknung mit einer wasserfesten Vergußmasse die Hohlräume zwischen den Fasern zu schließen und 2. die absorbierenden OH-Gruppen des Zellulosemoleküls durch Veränderung des Aufbaus des Moleküls zu beseitigen. Dieser zweite wichtigste Schritt ist durch Azetylierung, d.h. Bildung von Zellulosemonoazetat



erreicht worden. Das Erzeugnis ist bekannt unter dem Namen „Cotopa“ (vgl. S. 196). Es verbindet die guten mechanischen Eigenschaften der Baumwolle mit den hervorragenden elektrischen der Kunstseide<sup>3</sup>.

Der Erfolg in diesem besonderen Falle läßt sich wahrscheinlich auch auf andere Erzeugnisse übertragen. So ist die Möglichkeit der Azetylierung von Papier in gleicher Weise gegeben. Geht man noch einen Schritt weiter, so ist zu vermuten, daß auch andere Moleküle mit isolierenden Eigenschaften in ihrem chemischen Aufbau so geändert werden können, daß sie die Aufnahme von Wasser oder auch von Gasen praktisch unmöglich machen. So ergibt z. B. bereits die Behandlung des Kabelpapiers während der Tränkung mit Kohlendioxyd eine Verbesserung seiner elektrischen Werte<sup>4</sup>.

**Dielektrische Verluste.** Die am häufigsten geforderte elektrische Eigenschaft ist ein niedriger dielektrischer Verlustfaktor, noch dazu in

<sup>1</sup> MOREY, G. W.: J. Franklin Inst. Bd. 215 (1935) S. 315.

<sup>2</sup> KIEHL, H. R.: Physic. Rev. Bd. 7 (1936) S. 20.

<sup>3</sup> NEW, A. A.: Electr. Communic. Bd. 13 (1935) S. 216, 359.

<sup>4</sup> SHANKLIN, G. B.: Gen. Elect. Rev. Bd. 39 (1936) S. 370.

einem großen Frequenz- und Temperaturgebiet. Die Wechselwirkung zwischen Gleichstromleitfähigkeit und dielektrischem Verlustfaktor ist bekannt. Der Anteil, der von der Leitfähigkeit herrührt, nimmt mit abnehmender Frequenz zu. Er hängt eng mit den dielektrischen Nachladungserscheinungen zusammen.

Zur Erklärung der dielektrischen Erscheinungen dienen hauptsächlich zwei Vorstellungen. Die erste von K. W. WAGNER<sup>1</sup> geht aus von dem sog. Mehrschichtenkondensator, einem Dielektrikum, das kleinste Teilchen mit anderer Leitfähigkeit im Innern enthält. Sie wurde entwickelt auf Grund von Messungen an Paraffin, dem leitende Bestandteile zugesetzt waren. Die zweite von P. DEBYE<sup>2</sup> verlegt die Ursache der dielektrischen Erscheinungen direkt in das Molekülinnere durch Einführung des Dipolmomentes und der Polarisation. Daß beide Theorien ihre Berechtigung haben, ist durch Versuche bestätigt worden. Neuerdings wurden Untersuchungen an Paraffin wiederholt. Das Paraffin wurde mit Azetylpalmitat gemischt und die Messung des Verlustfaktors in einem großen Frequenzbereich ausgeführt. Die Veränderung des Verlustfaktors in Abhängigkeit von der Frequenz und der Temperatur stimmte mit der DEBYE'schen Theorie überein, obwohl hier offenbar ein Gemisch vorlag, für das die Theorie nach WAGNER Anwendung finden sollte<sup>3</sup>.

Man war bisher stets der Meinung, daß die dielektrischen Verluste bei niedrigen Frequenzen vorwiegend der Ionenleitfähigkeit zugeschrieben werden müssen, und daß der Dipolcharakter der Moleküle erst bei höheren Frequenzen von Bedeutung ist. Diese Vermutung trifft sicher nicht allgemein zu. Man nahm ursprünglich an, daß bei Frequenzen von 50 Hz und Raumtemperatur die physikalischen Bedingungen für das Auftreten eines Maximums des dielektrischen Verlustfaktors nach DEBYE, also hohe innere Viskosität und große, polare Molekülgruppen überhaupt nicht gegeben sind. Nach Messungen an gewissen Stoffen, z. B. chlorierten Diphenylmassen läßt sich jedoch ein Maximum des Verlustfaktors, das offenbar den polaren Gruppen zuzuschreiben ist, von  $10^7$  bis zu 50 Hz im Temperaturbereich von  $+40^\circ$  bis  $-5^\circ$  verfolgen<sup>4</sup>. Die Änderung der Viskosität entspricht dem Kurvenverlauf des Verlustfaktors. In ähnlicher Weise kann auch das Auftreten von Verlusten durch Ionenleitfähigkeit bei Hochfrequenz durch Hinzufügen eines entsprechend leitfähigen Anteils zum Prüfling nachgewiesen werden; allerdings sind Verluste auf Grund von Ionenleitfähigkeit bei Hochfrequenz in der Praxis verhältnismäßig selten.

Bei den Kristallen ist der dielektrische Verlustfaktor offenbar an

<sup>1</sup> SCHERING, H.: Isolierstoffe, Berlin 1924.

<sup>2</sup> DEBYE, P.: Polare Molekeln. Leipzig 1929.

<sup>3</sup> JACKSON, W.: Proc. Roy. Soc., Lond., Bd. 150 (1935) S. 197.

<sup>4</sup> JACKSON: Proc. Roy. Soc., Lond. Bd. 153 (1935) S. 158.



eine Elektronenleitfähigkeit gebunden. Steinsalz, Sylvin, Quarz, Flußspat, Turmalin und Glimmer besitzen Verlustfaktoren bei Raumtemperatur von  $\text{tg } \delta \approx 3 \cdot 10^{-4}$ . Dieser Wert ist praktisch von der Frequenz unabhängig. Solche Stoffe wären sehr geeignet als Isolierstoffe, wenn nicht ihre schwere Bearbeitbarkeit und andere ungünstige physikalische Eigenschaften, sowie der hohe Preis eine Verwendung in größerem Umfange hinderten.

Ein interessantes Beispiel für die Natur der dielektrischen Verluste bietet der Gummi<sup>1</sup>. Abb. 71 zeigt den Verlauf des Verlustfaktors, der Dielektrizitätskonstanten und der Leitfähigkeit in Abhängigkeit vom Schwefelgehalt. Nach den bisherigen Anschauungen ist das Kautschuk-

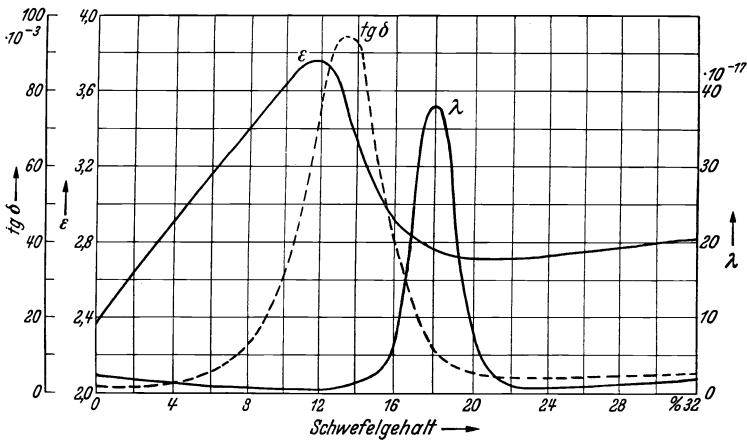


Abb. 71. Elektrische Eigenschaften von Gummi in Abhängigkeit vom Schwefelgehalt.

molekül selbst nicht polar, erst durch den Schwefelzusatz entstehen Dipole, die entsprechend dem Schwefelgehalt die Dielektrizitätskonstante erhöhen. Bei etwa 12% Schwefelgehalt beginnt der Gummi so hart zu werden, daß die polaren Moleküle keinen weiteren Beitrag zur Erhöhung der Dielektrizitätskonstanten liefern können, die Dielektrizitätskonstante sinkt. In ähnlicher Weise läßt sich auch der Verlauf des Verlustfaktors erklären, dessen Maximum bei technischen Frequenzen ungefähr mit dem der Dielektrizitätskonstanten übereinstimmt.

Wird die Temperatur erniedrigt, so tritt eine Verschiebung der Maxima für die Dielektrizitätskonstante wie für den Verlustfaktor nach geringerem Schwefelgehalt, in der Abb. 71 nach links, ein. Eine Temperaturerniedrigung bewirkt bekanntlich bei Gummi eine Härtung. Wird diese Härtung nicht durch die Temperaturerniedrigung, sondern durch einen äußeren Druck auf den Gummi hervorgerufen, so entsteht

<sup>1</sup> SCOTT, A. H., A. T. MC PHERSON u. H. L. CURTIS: Bur. Stand. J. Res. Bd. 11 (1933) S. 173.

die gleiche Verschiebung der elektrischen Eigenschaftskurve nach links wie durch Temperaturniedrigung. Ein wichtiger Zusammenhang zwischen mechanischen und elektrischen Eigenschaften ist damit dargetan.

Welche großen Unterschiede der elektrischen Eigenschaftswerte in handelsüblichen Hartgummiorten auftreten, zeigt die folgende Zahlentafel 6.

Man erkennt gleichzeitig daraus, daß die elektrischen Meßverfahren ein untrügliches Kriterium für die Kennzeichnung der Werkstoffe bilden und verdienen, noch stärker als bisher für die Bewertung herangezogen zu werden.

Zahlentafel 6. Elektrische Eigenschaften von Hartgummi.

Sorte	Dielektrischer Verlustfaktor bei 50 Hz $\text{tg } \delta \times 10^3$	Dielektrizitätskonstante $\epsilon$
1	3,8	3,0
2	4,0	3,0
3	4,6	3,0
4	5,0	3,0
5	6,0	3,0
6	7,0	3,1
7	8,1	3,1
8	9,0	4,0
9	11,7	3,8
10	18,2	4,1
11	30,0	5,5
12	41,0	5,1
13	137,0	5,2

Das Ziel der Technik muß sein, möglichst nur Isolierstoffe mit verschwindend kleinen dielektrischen Verlusten anzuwenden. Diese Forderung verlangt von den Herstellern und Verarbeitern 1. Vermeidung aller Inhomogenitäten im Isolierstoff, da sie eine der Ursachen von Verlusten bilden. Dies ist allgemein nicht durchführbar, da sehr viele Werkstoffe inhomogen sind, d. h. mit Zusätzen innig gemischt bereitet werden. Wohl aber lassen sich gewisse unerwünschte Inhomogenitäten

ten, z. B. Verunreinigungen durch Metalle, Feuchtigkeit usw. weitgehend ausschalten. Dies hat in allen Fällen zu einer wesentlichen Besserung der elektrischen Eigenschaften geführt; 2. Beseitigung aller polaren Moleküle oder Molekülgruppen. In den meisten Fällen wird der Stoff noch polare Moleküle enthalten. Tatsächlich läßt sich jedoch unter Berücksichtigung von 1 und 2 die Forderung auf niedrige dielektrische Verluste fast stets erfüllen; freilich werden außerdem meist andere mechanische Eigenschaften verlangt, denen der Isolierstoff genügen muß, und die zu den ersten Forderungen im Widerspruch stehen. Es ist deshalb die Aufgabe des Ingenieurs, die Isolierstoffe so auszuwählen, daß wenigstens in dem Temperatur- und Frequenzbereich, in dem der Werkstoff arbeiten soll, die Verluste gering sind, während die Maxima, sei es nach DEBYE oder WAGNER, außerhalb dieses Gebietes liegen.

**Elektrische Durchschlagsfestigkeit.** Für die Hochspannungstechnik ist die Frage nach der Durchschlagsfestigkeit der Isolierstoffe von Bedeutung (vgl. S. 167). Eine Lösung dieses physikalischen Problems derart, daß z. B. die Werte der Durchschlagsspannung auf Grund anderer physikalischer Eigenschaften errechnet werden können, ist für die festen

und flüssigen Isolierstoffe allgemein noch nicht geglückt. Übliche Verfahren zur Ermittlung der Durchschlagsspannung sind aus der Prüftechnik bekannt.

Um aus der Durchschlagsspannung Anhaltspunkte über den physikalischen Vorgang des Mechanismus zu bekommen, sind besondere Untersuchungen dieser kurzzeitigen Vorgänge nötig. Der Kathodenstrahl-oszillograph für die Aufzeichnung schnell veränderlicher elektrischer Spannungszustände ist für die Beobachtung des Verlaufes der Spannung an den Prüfelektroden geeignet. Nimmt man z. B. die statische Durchschlagsspannung von Transformatorenöl auf, so findet man im Spannungszusammenbruch bei Anwendung von Plattenelektroden eine Stufe, d. h. die Spannung an den Elektroden bricht nicht sofort zusammen, sondern fällt etwa auf  $\frac{1}{4}$  des Wertes, um dann in einer oder mehreren Stufen in kurzer Zeit abzusinken. In Luft sind bei Durchschlägen von verschiedenen Forschern ähnliche Stufen beobachtet worden<sup>1</sup>. Diese Erscheinung ist noch ungeklärt.

Ein anderes Verfahren der Spannungsregistrierung ist von TORIYAMA<sup>2</sup> angegeben worden. Ähnlich wie die Lichtenbergschen Figuren werden die Spuren der elektrischen Entladungen auf Isolierstoffplatten durch nachträgliches Bestreuen der Platten mit Mennige und Lykopodium sichtbar gemacht. Die Stellen, an denen die Elektrodenkanäle während der Spannungsbeanspruchung verlaufen, halten das Pulver fest. Mennige und Harz, also rotes und

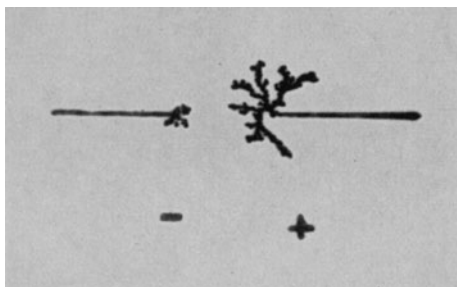


Abb. 72. Entladungserscheinungen in Flüssigkeiten.

weißes Pulver, geben dabei gleichzeitig einen Anhaltspunkt über die Polarität der Entladungslinien. Die Staubfiguren bei der Untersuchung des Durchschlages in Flüssigkeiten sind in der Weise herzustellen, daß die Platte nach der Herausnahme aus der Flüssigkeit mit dem Pulver bestreut wird. In der Abb. 72 sieht man eine Aufnahme mit Figuren, die durch Stoßbeanspruchung unter Petroleum als Dielektrikum entstanden sind. Die Figur hat eine gewisse Ähnlichkeit mit den Durchschlagsfiguren in Luft. Offenbar werden auch die Entladungserscheinungen in Flüssigkeiten durch Stoßionisation und nicht durch thermische oder mechanische Wirkung hervorgerufen. Der eigentliche Durchschlag tritt nach den Versuchen von TORIYAMA ein, sobald sich die Entladungskanäle be-

<sup>1</sup> Vgl. ROGOWSKI, W.: Z. techn. Phys. Bd. 13 (1932) S. 97.

<sup>2</sup> TORIYAMA, Y.: Man. Fac. Engin. Hokkaido Univ. Bd. 2 (1929) S. 21.

rühren. Man hat mit diesem Beobachtungsverfahren ein Hilfsmittel an der Hand, um das Vorwachsen der Entladung in Abhängigkeit von der Höhe der angelegten Spannung zu beobachten.

Um die Entstehung des Funkens zeitlich zu verfolgen, kann die Entladung entweder mittels eines Zeitdehners, der die photographische Aufnahme von 80 000 Bildern<sup>1</sup> in der Sekunde gestattet oder mit Hilfe eines elektrooptischen Verschlusses<sup>2</sup> untersucht werden, der gewisse Zeitausschnitte aus der Funkenentladung herausblendet. Die Funkenstrecke wird dazu durch gekreuzte Nicols beobachtet und durch eine zweite Funkenstrecke belichtet. Zwischen den Nicols befindet sich eine Kerrzelle. An ihr liegt die Spannung der Beleuchtungsfunkenstrecke, die bewirkt, daß das Licht durch die Nicols nur für einen genau definierten Zeitpunkt auf das Auge des Beobachters fällt. Augenblick und Zeitdauer der Öffnung dieses elektrooptischen Verschlusses sind von der Länge der Leitung zur Kerrzelle abhängig. Das Ergebnis der Untersuchung ist, daß die optisch sichtbare Ionisation stets an den Enden intensiver erscheint, eine Tatsache, die nach den Staubfiguren von TORIYAMA einleuchtend ist. Werden die Durchschläge mit Stoßspannung von  $10^{-6}$  s Dauer ausgeführt, so sollte man annehmen, daß eine Zunahme der Gleichmäßigkeit des Leuchtens eintritt. Experimentell ist dies jedoch nicht bestätigt worden.

KIRSCHSTEIN und KOPPELMANN<sup>3</sup> wenden ein photographisch registrierendes Verfahren an, um die Vorgänge während der Entladung in Flüssigkeiten verfolgen zu können. Die Aufnahmeanordnung besteht aus einer rotierenden Filmtrommel, auf die durch ein Objektiv ein stark vergrößertes und durch einen Spalt begrenztes Bild des zu untersuchenden Lichtbogens zeitlich aufgelöst photographiert wird. Die Elektroden und jede zwischen ihnen entstehende Gasblase bilden sich auf der Trommel als Schatten ab, während im Augenblick des Durchschlags der ganze Spalt durch das Licht des Funkens belichtet wird, so daß auf dem Film ein feiner Strich von der Breite des Spaltes, 0,2 mm, den Durchschlag anzeigt. Man erkennt dann, wie sich nach dem Durchschlag von Flüssigkeiten eine Gasblase ausbildet. KOPPELMANN hat eine der Elektroden durch eine aus dem unteren Ende eines Metallrohres herausgedrückte Luftblase ersetzt. Bei dieser Anordnung ist zu erwarten, daß sich beim Anlegen eines Feldes die Elektrodenladung auf die Oberfläche der Gasblase legt, und daß diese durch die Coulombschen Kräfte zur Gegenelektrode gedrückt wird. Die Versuche zeigen, daß tatsächlich etwas Derartiges eintritt. In der Mitte des belichteten Streifens, etwa  $10^{-3}$  s vor dem ersten Durchschlagsfunken, schiebt sich keilförmig der Schatten einer vorschießenden Gasblase ein.

<sup>1</sup> AEG-Mitt. Bd. 6 (1933) S. 214.

<sup>2</sup> DUNNINGTON, F. G.: Phys. Rev. (2) Bd. 37 (1931) S. 230.

<sup>3</sup> KOPPELMANN: Z. techn. Phys. Bd. 16 (1935) S. 124.

Man hat versucht, diese Meßergebnisse zur Grundlage einer theoretischen Deutung des Durchschlags zu machen. Hier bieten Kristalle wegen ihres bekannten Molekülaufbaues zur Erforschung des Durchschlagsmechanismus die beste Grundlage. Man hat Durchschlagsfestigkeiten von  $10^6$  V/cm an ihnen gemessen. Aus theoretischen Ableitungen folgt jedoch für die Durchschlagsfestigkeit ein Wert in der Größenordnung von  $10^8$  V/cm. Zur Erklärung dieser Differenz nimmt v. HIPPEL<sup>1</sup> einen Stoßionisationsvorgang an. Das Kontinuum der Wärmeschwingung bricht bei der Frequenz  $\nu_m$  entsprechend einer Anregungsspannung  $eV = h \cdot \nu_m$  plötzlich ab. Bis zu dieser Spannung eines äußeren Feldes werden die Elektronen ihre Energie als Gitterschwingungen an das Molekül abgeben können. Steigt die äußere Spannung weiter, so wird mit steigender Geschwindigkeit eine elastische Reflexion im Gitter wahrscheinlicher, die Energie der Elektronen wird dann auf ihrer freien Weglänge von etwa  $10^{-6}$  cm unter dem Einfluß des äußeren elektrischen Feldes wachsen, bis die für die Stoßionisation nötige Energie erreicht wird. Daß der Durchschlag in Kristallen teilweise in ausgezeichneten Bahnen, den Kristallebenen, vor sich geht (vgl. Abb. 22 S. 24), wird durch die elektrische Anisotropie der Leitungselektronen erklärt, die bei Metallen bereits bekannt ist. Wie SCHEFFERS und JUSTI<sup>2</sup> gezeigt haben, ist diese Anisotropie auch bei regulären Metallkristallen vorhanden. Ähnliche Vorgänge mögen sich auch in den amorphen Isolierstoffen unter der Einwirkung der elektrischen Spannung abspielen und zu einem elektrischen Durchschlag<sup>3</sup> führen. Aus dem Verlauf der Durchschlagsspannung in Abhängigkeit von der Beanspruchungsdauer ist jedoch zu vermuten, daß außer dem elektrischen auch der Wärmedurchschlag nach WAGNER möglich ist. Die Vorstellung, daß sich zwischen den Elektroden im Isolierstoff ein heißer Kanal bildet, ist aus thermischen Messungen wahrscheinlich. Neuerdings ist die Theorie des Wärmedurchschlags<sup>4</sup> so erweitert worden, daß sie die Berechnung der Durchschlagsspannung ermöglicht, wenn die elektrische und die thermische Leitfähigkeit des Stoffes in Abhängigkeit von der Temperatur bekannt sind.

Bei flüssigen Isolierstoffen ist man der Klärung des Durchschlagsvorganges durch die Arbeiten von FERRANT, KOPPELMANN<sup>5</sup> u. a. nahe gekommen. Die Versuche, Vorstellungen über den Gasdurchschlag auf Flüssigkeiten als verdichtete Gase zu übertragen, sind aufgegeben. Bei den flüssigen Isolierstoffen sind die Schwierigkeiten der Beschaffung einwandfreier experimenteller Ergebnisse außerordentlich groß, denn

<sup>1</sup> v. HIPPEL: Erg. d. exakt. Naturwiss. Bd. 14 (1935) S. 79.

<sup>2</sup> JUSTI u. SCHEFFERS: Physik. Z. Bd. 37 (1936) S. 700.

<sup>3</sup> ROGOWSKI: Arch. Elektrotechn. Bd. 23 (1930) S. 569.

<sup>4</sup> BECKER, R.: Arch. Elektrotechn. Bd. 30 (1936) S. 411.

<sup>5</sup> KOPPELMANN: Z. techn. Physik Bd. 16 (1935) S. 124.

jeder Durchschlag bewirkt u. U. eine Verunreinigung der Flüssigkeit, und geringfügigste Verunreinigungen sind eben nur aus der Höhe der Durchschlagsspannung festzustellen.

Ein einfacher gesetzmäßiger Zusammenhang besteht bei Ölen zwischen der Durchschlagsspannung und dem relativen Gehalt an gelöster Luft. Hier stellen offenbar unreine Flüssigkeiten nur das Lösungsmittel des über der Flüssigkeit stehenden Gases dar. Für die Abhängigkeit der Durchschlagsspannung von der absorbierten Gasmenge gilt:  $U = U_0 \cdot D^0,55$ . Es bedeuten  $U$  = Durchschlagsspannung,  $U_0$  = Durchschlagsspannung bei 20° und 760 mm Barometerstand,  $D$  = rel. Gasdichte in der Flüssigkeit<sup>1</sup>.

Außer einem rein elektrischen oder einem Wärmedurchschlag ist bei Flüssigkeiten noch ein mechanisch-elektrischer Durchschlagsmechanismus in Betracht zu ziehen. Unter dem Einfluß des Feldes bilden sich an den Elektroden Gasblasen, die sich unter den Feldkräften verformen. Auf den Grenzflächen Flüssigkeit — Gas — Metall treten Ladungen auf. KOPPELMANN<sup>2</sup> berechnet aus dem Druck  $p - p_D$ , ( $p$  = äußerer Druck,  $p_D$  = Dampfdruck der Flüssigkeit), mit dem die Flüssigkeit gegen die Elektroden gedrückt wird, dem Dampfdruck der Flüssigkeit, einer Adhäsionskraft  $P$  zwischen Flüssigkeit und Elektrode und der Dielektrizitätskonstanten die Durchschlagfestigkeit  $E_D = 10^5 \sqrt{\frac{P + (p - p_D)}{3,3 \cdot \epsilon}}$  in V/cm.

Bezüglich der Durchschlagsspannung von Gasen muß auf die Arbeiten von TOWNSEND, ROGOWSKI, v. HIPPEL, SCHUMANN u. a. verwiesen werden.

### Chemische Gesichtspunkte bei den Kunststoffen.

Bei den neueren Kunststoffen nehmen die chemischen Prüfungen naturgemäß einen weiten Raum ein. Zu den chemischen Prüfungen sind zu rechnen 1. Untersuchungen über das Verhalten der Isolierstoffe gegenüber Chemikalien und Dämpfen, Prüfungen, die verhältnismäßig leicht in jedem Laboratorium ausgeführt werden können. Es rechnen jedoch 2. auch alle die Untersuchungen hierzu, die sich mit der Ermittlung des chemischen Molekülaufbaus der Isolierstoffe und ihren dadurch bedingten Eigenschaften beschäftigen. Über den chemischen Aufbau der Kunststoffmoleküle hat man in den letzten Jahren wichtige Erkenntnisse gewonnen. So ist z. B. bekannt, daß man es bei den Molekülen gewisser Kunststoffe mit sehr langen Kettenmolekülen zu tun hat. Die Eigenschaften sind durch diese Struktur der Moleküle bedingt. Man hat versucht, die Struktur dadurch zu ändern, daß man die Ketten untereinander nach Form eines Netzwerks dreidimensional verknüpfte. Das be-

<sup>1</sup> CLARK: Electr. Engng. Bd. 54 (1935) S. 50.

<sup>2</sup> KOPPELMANN, a. a. O.

kannteste Beispiel für Phenolharze ist die Umwandlung des kettenförmigen, löslichen und schmelzbaren Novolakmoleküls in das dreidimensionale, unlösliche und unschmelzbare Harz durch Formaldehyd, der hier eine Netzbildung der Moleküle bewirkt. Ein ähnlicher Gedanke wurde mit Erfolg von STAUDINGER und HEUER<sup>1</sup> bei Styrolharzen angewandt. Sie beobachteten, daß bereits ein Zusatz von 0,002% Divinyl-Benzol den Erweichungspunkt des Polystyrols wesentlich erhöhte. Das Endprodukt war in Benzol nicht mehr löslich. Auch die Unterschiede von Phenol- und Harnstoffharzen in ihrem physikalischen Verhalten bei den Kriechstromversuchen führt man, ob mit Recht oder Unrecht sei noch dahingestellt, auf die verschiedenen Bindungen in der polymeren Molekülkette zurück. Die Bindungen werden im ersten Fall (Phenolharze) durch Kohlenstoffatome, im zweiten Fall (Harnstoffharze) durch Stickstoffatome bewirkt. Dieser unterschiedliche chemische Aufbau mag auch die Ursache dafür sein, daß Phenolformaldehydharze gegen Säuren, Harnstoffharze jedoch gegen Alkalien widerstandsfähiger sind.

### Anwendung der Röntgentechnik zur Erforschung organischer Isolierstoffmoleküle.

Auch auf dem Gebiete der organischen Isolierstoffe (anorganische Stoffe s. Vortrag I, S. 36) hat sich die Röntgentechnik als wichtiges Hilfsmittel zur Erforschung des Molekülaufbaus erwiesen. Es ist bekannt, daß es sich auch bei den organischen Stoffen um röntgentechnisch erfaßbare kristallographische Elementarzellen bzw. Raumgruppen handelt. Da auf den Aufnahmen keine Röntgenlinien sondern verwaschene Schwärzungen entstehen, erfolgt die Auswertung mit einem integrierenden Photometer. Die Ergebnisse sind besonders aufschlußreich, weil sie uns direkt eine Vorstellung über die ebenen zweidimensionalen chemischen Formeln vermitteln, und weil sie in sehr schöner Weise die Vorstellung der organischen Chemie von den Radikalen und Ringsystemen bestätigen, denen die Chemie in so zweckdienlicher Weise eine Individualität zuschreibt. In der Abb. 73 (siehe folgende Seite) ist die Auswertung einer Aufnahme an Naphthalin wiedergegeben, die von ROBINSON<sup>2</sup> als Konturkarte gezeichnet wurde. Auch die Veränderung des Kristallgitters, z. B. von Paraffinen beim Durchgang durch den Schmelzpunkt, wurde so untersucht und ein Zusammenhang zwischen der Reihenfolge der verschiedenen DEBYE-SCHERRER-Linien beim Schmelzen des Kristalls und den Strukturänderungen, die dabei stattfinden, festgestellt. Chemische Parallelversuche wurden von A. MÜLLER<sup>3</sup> vorgenommen.

Stoffe wie Zellulose und ihre Derivate sind mittels Röntgenstrahlen

<sup>1</sup> STAUDINGER u. HUSEMANN: Ber. dtsh. chem. Ges. Bd. 68 (1935) S. 1618.

<sup>2</sup> ROBINSON, B. W.: Ergebnisse d. techn. Röntgenkde. Bd. 4 S. 3. Leipzig 1934.

<sup>3</sup> MÜLLER, A.: Helv. phys. Acta Bd. 7 (1936) S. 626.

eingehend erforscht worden<sup>1</sup>. Die Faserstoffe ergeben saubere Röntgen-diagramme, die direkt zur Unterscheidung von Nitrozellulose, Azetylzellulose usw. verwendet werden können. Der Aufbau des Gitters der Zellulose, also die Kristallstrukturanalyse ist mit Erfolg von MEYER und MARK<sup>2</sup> versucht worden. Eine Vertiefung der Kenntnisse vom Reaktionsmechanismus kann jedoch auf dieser Grundlage noch nicht erwartet

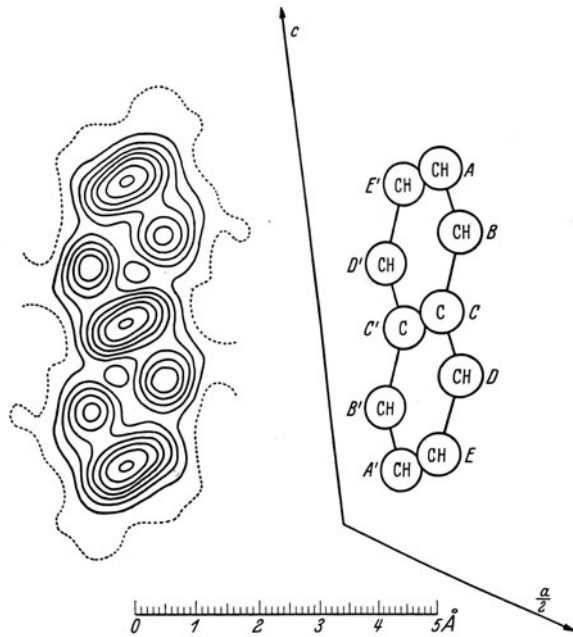


Abb. 73.  
Röntgenkonturkarte von Naphthalin nach Robinson.

werden, wenngleich wir auch durch die genannten Untersuchungen eine Vorstellung von dem Aufbau und den Valenzen des Kettenmoleküls gewonnen haben.

### Gefügeuntersuchungen durch Schliffbilder.

In der Metallographie verdanken wir der Herstellung von Oberflächenschliffen, der Ätzung des Schliffes und der nachfolgenden mikroskopischen Untersuchung wichtige Aufklärungen über das Metallgefüge. Die Kenntnis der Einkristalle und der eutektischen Legierungen wurde durch das Mikroskop dem Beobachter sozusagen plastisch greifbar. Bei den Kunststoffen hat man erst neuerdings das Mikroskop planmäßig zur Prüfung

<sup>1</sup> HESS, K. u. C. TROGUS: Ergebnisse d. techn. Röntgenkde. Bd. 4 S. 3. Leipzig 1934.

<sup>2</sup> MARK, H. u. MEYER, K.: Z. phys. Chem. (B) Bd. 2 (1929) S. 137.



herangezogen. Abb. 74 und 75 zeigen Aufnahmen des Oberflächengefüges vom Isolierpreßstoff Typ T; die Aufnahmen lassen im Dunkelfeld das Gitterwerk der Faserstoffeinlage, im Hellfeld den Harzanteil deutlich erkennen. In ähnlicher Weise sind auch Dünnschliffe herzustellen und zur Beurteilung des Stoffes auch bei Dreistoffgemischen heranzuziehen<sup>1</sup>. Da wir es hier mit einem jungen Zweig der Prüftechnik zu tun haben, fehlt z.Zt. noch die Beziehung der mikroskopischen Schliffbilder zu den übrigen Stoffeigenschaften. Es sind Arbeiten im Gange, die versuchen,

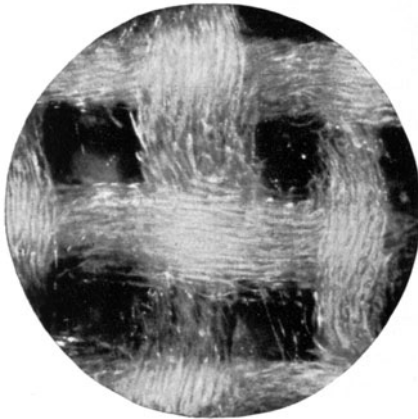


Abb. 74. Oberflächengefüge Typ T, Dunkelfeld.



Abb. 75. Oberflächengefüge Typ T, Hellfeld.

aus den mikroskopischen Bildern Erkenntnisse für das makroskopische Verhalten zu gewinnen; auf anderen Gebieten, auf die im folgenden noch eingegangen wird, ist dies mit Erfolg gelungen.

### Mechanische Eigenschaften.

Die mechanischen Eigenschaften vieler Kunststoffe (anorganische Stoffe s. S. 1, 121 und 251) sind durch Füllstoffe, insbesondere Faserstoffe zu verbessern. Auch pulverförmige Stoffe sind zu verwenden, sofern hier das Harz die Möglichkeit hat, durch Eindringen in mikroskopisch feine Spalten eine feste Verbindung zwischen den einzelnen Körnern herzustellen.

Für die mechanischen Eigenschaften der Gummimischungen aus Natur- oder Kunstkauschuk ist die Kenntnis des Einflusses der Füll- und Farbstoffe von Bedeutung. Es spielt jedoch der Füllstoff nicht nur als solcher eine Rolle, sondern es ist auch wichtig, in welcher Feinheit und Struktur er der Mischung zugesetzt wird. Um diesen Einfluß zu erkennen, wurde durch einen Versuch die Kräfteverteilung in einem

<sup>1</sup> VIEWEG, R.: Ber. VDI, 74. Hauptvers. 1936, S. 51. — W. WEIGEL in „Kunst- und Preßstoffe“, Heft 1 u. 2, Sonderhefte VDI-Verlag, 1937.

Gummistreifen sichtbar gemacht. In eine Gummiplatte sind Gummistücke von bestimmten, geometrisch einfachen Abmessungen einvulkanisiert. Auf die Gummipplatten wird ein quadratisches Netz aufgezeichnet und an diesen Streifen die übliche Zugprüfung ausgeführt.

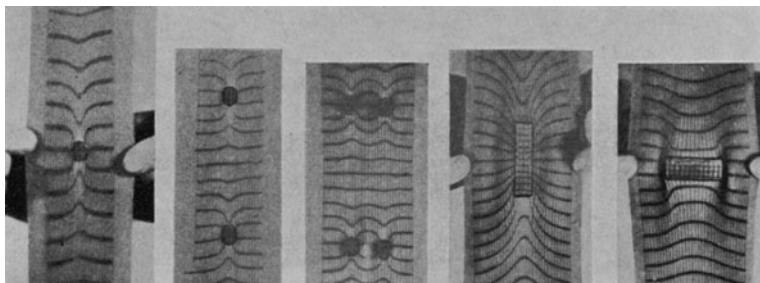


Abb. 76. Kräfteverteilung in inhomogenen Gummibändern.

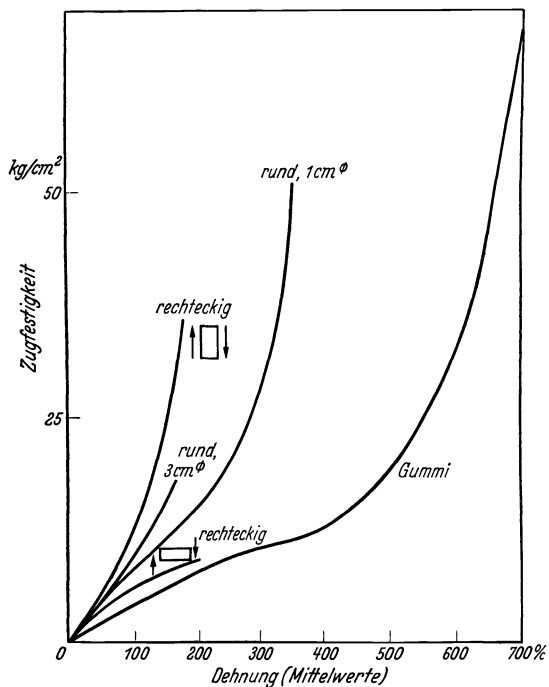


Abb. 77. Einfluß der Fremdkörper auf die mechanischen Eigenschaften von Gummi.

Es ergeben sich dann die in der Abb. 76 dargestellten Kräfteverteilungen, die durch den Verlauf der Netzlinien deutlich zu erkennen sind. Die eingesetzten Fremdkörper, die in Wirklichkeit in der Gummiplatte nicht zu sehen sind, treten nunmehr in der Abbildung deutlich hervor. Abb. 77 zeigt den Einfluß auf die mechanischen Eigenschaften der Gummistreifen. Daraus ist zu schließen, daß Füllstoffe, deren Teilchengröße bestimmte Werte überschreitet, auf die Gleichförmigkeit der Kräfteverteilung im Gummi und die mechanischen Eigenschaften

ungefähr dieselben Wirkungen haben müssen. Entsprechende Parallelversuche mit ausgesuchten Füllstoffen haben diese Vermutungen bestätigt<sup>1</sup>.

<sup>1</sup> BARNETT, C. E.: Phys. Bd. 7 (1936) S. 189.

### Spannungsoptische Prüfergebnisse.

Die Verwendung von Kunststoffen zu spannungsoptischen Untersuchungen im Maschinenbau ist im Steigen begriffen, da die Herstellung von Modellen aus Kunststoffen relativ einfach ist und Stoffe mit genügender optischer Empfindlichkeit zur Verfügung stehen<sup>1</sup>. Einen Überblick gibt die folgende Zahlentafel 7.

Zahlentafel 7.

Werkstoff	Rel. spannungs-optische Empfindlichkeit	Max. Belastbarkeit kg/cm <sup>2</sup>	Elastizitätsmodul kg/cm <sup>2</sup>
Glas . . . . .	1,0	—	640 000
Zelluloid . . . . .	4,1	530	25 000
Tenit . . . . .	4,5	350	19 000
Vynylit . . . . .	12,8	320	18 000
Orca (Franz.) . . .	14	—	—
Bakelit (gegossen) .	16,5	1000	48 000
Phenolit (Japan) . .	21,0	600	70 000
Marblette . . . . .	49	—	—
Fiberlon . . . . .	57,5	180	8 000

Die Abb. 78 zeigt die Spannungsverteilung in einem Arm, der aus zwei Stücken durch Schweißung zusammengesetzt und auf Biegung beansprucht ist, im polarisierten Licht. Im Zusammenhang mit diesen Untersuchungen ist ein wichtiges optisches Ergebnis zu erwähnen:

die Herstellung von Folien beliebiger Größe, die das Licht polarisieren. Bisher war die Herstellung polarisierten Lichtes nur im Laboratorium mit Hilfe teurer Kalkspatprismen möglich. Jetzt eröffnen sich der Anwendung polarisierten Lichtes in der Praxis neue Gebiete. Die Folien, die diese

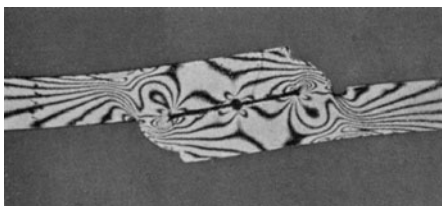


Abb. 78. Spannungsoptische Untersuchung eines zusammengesetzten Stückes.

merkwürdige Eigenschaft der Polarisation zeigen, bestehen aus einem Kunststofffilm. Der Film ist der Träger von ultramikroskopisch kleinen doppeltbrechenden Kristallen aus Herapathit, einem Chininsulfat. 1 cm<sup>2</sup> Fläche enthält etwa 10<sup>11</sup> derartig regellos verteilte Kristalle. Durch eine vorsichtige Dehnung des Films in einer Richtung erhalten die ultra-

<sup>1</sup> FÖPPL u. NEUBER: Festigkeitslehre mittels Spannungsoptik. München und Berlin 1935.

Kunststoff	Mechanische Eigenschaften							Wider- im In- M $\Omega$ im Anliefe- rungs- zustand
	Spezifisches Gewicht	Biege- festig- keit <sup>2</sup> kg/cm <sup>2</sup>	Schlag- biege- festig- keit <sup>2</sup> cm kg/cm <sup>2</sup>	Druck- festig- keit <sup>3</sup> kg/cm <sup>2</sup>	Zug- festig- keit kg/cm <sup>2</sup>	Kugel- druck- härte <sup>2</sup> kg/cm <sup>2</sup>	Elasti- zitäts- modul kg/cm <sup>2</sup>	
Azetylzellulosemassen . . .	1,30 bis 1,50	300—550	15—100	500—575	350—500	500—600	19 000	500 000 bis 800 000
Benzylzellulosemassen . . .	1,20 bis 1,30	700	75	500	350	680	25 000	> 1 × 10 <sup>6</sup>
Gießharz . . . . .	1,35	1200	25—30	1300	600	1200	37 000	200 000
Hartgewebe . . . . .	1,4	1300 <sup>1</sup>	30 <sup>1</sup>	2000 <sup>1</sup>	500—800	1300 <sup>1</sup>	60 000 bis 90 000	1000 bis 200 000
Hartholz . . . . .	1,20 bis 1,40	2500 bis 3000	80—100		2000 bis 2400	1400 bis 1600	200 000	10 000 bis 100 000
Hartpapier Kl. I (Stanzqualität) . . .	1,4	1500 <sup>1</sup>	25 <sup>1</sup>	1500 <sup>1</sup>	1200 <sup>1</sup>	1300 <sup>1</sup>		50 000 bis 100 000
Kl. II (Konstruktionsqual.)	1,4	1500 <sup>1</sup>	25 <sup>1</sup>	1500 <sup>1</sup>	1200 <sup>1</sup>	1300 <sup>1</sup>		100 000 bis 300 000
„ III (Telephonbauqual.)	1,4	1500 <sup>1</sup>	25 <sup>1</sup>	1500 <sup>1</sup>	1200 <sup>1</sup>	1300 <sup>1</sup>	50 000 bis 110 000	1 × 10 <sup>6</sup>
„ IV (Tropenqualität) . .	1,4	1500 <sup>1</sup>	25 <sup>1</sup>	1500 <sup>1</sup>	1200 <sup>1</sup>	1300 <sup>1</sup>		1 × 10 <sup>6</sup>
Igelit . . . . .	1,30 bis 1,40	1100	150 bis 250	—	600	960	40 000	> 1 × 10 <sup>6</sup>
Kunstthorn . . . . .	1,30 bis 1,40	1000 bis 1800	20—40	700 bis 1200	—	1300	—	10 000
Luvican . . . . .	1,2	900 bis 1000	6—10	800	—	1200	45 000	> 1 × 10 <sup>6</sup>
Mischester-Polymerisate, Handelsnamen Mipolam, Astralon, Decelith . . . .	1,34	1000	bis 400	780	600	1000	32 000	> 1 × 10 <sup>6</sup>
Nitrozellulose . . . . .	1,8	500	6	900	300	800	6 500	1 × 10 <sup>6</sup>
Oppanol . . . . .	0,93				60 <sup>10</sup>		12	> 1 × 10 <sup>6</sup>
Polystyrol (Trolitul) . . . .	1,05	1100	20	950	400	1100	30 000	> 1 × 10 <sup>6</sup>
Polyacrylsäureester (Plexi- gum) . . . . .	1,18	700 bis 1000	15—20	—	750	1200	—	> 1 × 10 <sup>6</sup>
Vergußharze . . . . .	1,35	1200	25—30	1300	600	1200	20 000	200 000 bis 1 × 10 <sup>6</sup>
Vulkanfiber . . . . .	1,10 bis 1,45	800 bis 1300	120 bis 190	3000	500 bis 1200	800 bis 1400	50 000	> 1000
Zelluloid . . . . .	1,38	600	100—150	600	600—700	600	25 000	25 000

<sup>1</sup> Mindestwerte nach VDE 0324, die bei einwandfreier Verarbeitung des Rohstoffes wesentlich überschritten werden. <sup>2</sup> Bestimmt nach VDE 0302. <sup>3</sup> An Probekörpern von 10 × 10 × 10 mm ermittelt.

<sup>4</sup> Bestimmt nach VDE 0303.

tafel 8.

stand nern <sup>4</sup> nach 4 Tagen in 80% rel. Feuch- tigkeit	Elektrische Eigenschaften					Thermische Eigenschaften					
	Oberflächen- widerstand <sup>2</sup> MΩ		Dielektrischer Verlustfaktor <sup>4</sup> (20°)		Dielek- trizitäts- kon- stante <sup>4</sup>	Durch- schlags- festig- keit <sup>4</sup> kV/mm	Wärme- leit- fähig- keit kcal/mh °C	Wärme- festig- keit nach Martens °C	Lin. therm. Ausdeh- nungs- koeffi- zient × 10 <sup>6</sup>	Glut- festig- keit <sup>7</sup> Güte- grad	
	im An- liefe- rungs- zustand	nach 24 Stun- den im Wasser	bei 800 Hz	bei 1 × 10 <sup>6</sup> Hz							
4000 bis 50000 800000	150 000 bis 300 000 > 1 × 10 <sup>6</sup>	2000 bis 20 000 750 000	0,028 bis 0,045 0,0048 bis 0,0065 0,04 bis 0,2		0,011	6—6,9 2,9	30 bis 45 40	0,180 bis 0,220 —	40 <sup>1</sup> 55	110 bis 130 100	1 1 3
100 bis 1000	10 000	1000	0,05 bis 0,2			5—6	20	0,290 bis 0,299 —	100 <sup>1</sup> —	10 bis 25 —	2 2
400 bis 99 000 5000 bis 30 000	9000 bis 300 000 —	100 bis 38 000 <sup>5</sup> —	—			—	—	—	—	—	—
2000 bis 5000	50 000 bis 100 000	2000 bis 5000 <sup>5</sup>	< 0,1			5—8		—	—	—	—
15000 bis 25000 35 000	150 000 bis 300 000 1 × 10 <sup>6</sup>	15 000 bis 25 000 <sup>5</sup> 35 000 <sup>5</sup>	< 0,1			5—6		—	—	—	—
30000 bis 50000	1 × 10 <sup>6</sup>	50 000 <sup>5</sup>	0,006 bis 0,05 0,006 bis 0,02	0,34	0,34	5—6	20 bis 35 unter Ö1	0,21 bis 0,24 —	—	10 bis 25	2—3
> 1 × 10 <sup>6</sup>	> 1 × 10 <sup>6</sup>	1 × 10 <sup>6</sup>	0,015 bis 0,02 0,14	0,016		3,1—3,5	30 bis 50 5	0,14 bis 0,18 ca. 0,15	60—70 50—60	—	2 2
50	50 000	10	0,0007, 0,0010 <sup>6</sup>	0,001		2,95 3,5 <sup>9</sup>	50	—	100—150	40	2
> 1 × 10 <sup>6</sup>	> 1 × 10 <sup>6</sup>	> 1 × 10 <sup>6</sup>	0,007 bis 0,022			3,2	50	ca. 0,18	60	78	2
> 1 × 10 <sup>6</sup>	1 × 10 <sup>6</sup>	> 1 × 10 <sup>6</sup>	0,007 bis 0,022			3,2	50	ca. 0,18	60	78	2
1 × 10 <sup>6</sup>	1 × 10 <sup>6</sup>	200 000	0,03	0,03		5,9	40 bis 50 20	ca. 0,32	40	100	2
— > 1 × 10 <sup>6</sup>	1 × 10 <sup>6</sup> > 1 × 10 <sup>6</sup>	> 1 × 10 <sup>6</sup>	0,0004 0,0002	< 0,001		2,3 2,3	50	0,135; 0,348 <sup>6</sup>	60—70	102	1
—	> 1 × 10 <sup>6</sup>	> 1 × 10 <sup>6</sup>	0,01 bis 0,1			3—3,6	45	0,16	60—70	120	1
< 1000	10 000	—	0,04			7—8	30	0,18	55	96	3
—	> 1000	—	—			—	3	—	70—90	—	—
2000	170 000	17 000	0,025			5,9	30	0,18	40	100	0

<sup>5</sup> Nach 4 Tagen in 80% rel. Feuchtigkeit.  
VDE 0305. <sup>8</sup> Bei 800 Hz und 100%.  
Härte nach Shore 35.

<sup>6</sup> Mit Quarzmehl gefüllt. <sup>7</sup> Bestimmt nach  
<sup>9</sup> Bei 1 × 10<sup>6</sup> Hz. <sup>10</sup> Dehnung etwa 1000%.

mikroskopisch kleinen Kristalle eine einheitliche Richtung, so daß der ganze Film wie ein großer, das Licht polarisierender Kristall wirkt. Die Polarisationswirkung ist nicht im ganzen Spektralbereich in gleicher Weise vorhanden, jedoch so gut, daß die Filme als Filter bei photographischen Aufnahmen, als Blendschutz usw.<sup>1</sup> Verwendung finden.

### Zahlenwerte.

In der Zahlentafel 8<sup>2</sup> auf Seite 118/119 sind für wichtige Kunststoffe außerhalb der Typisierung die meist gefragten Stoffeigenschaften angegeben. Da diese von der Art der Herstellung und der Verarbeitung in weiten Grenzen abhängig sind, ist in vielen Fällen nur der Bereich aufgeführt, in dem die Werte sicher liegen. Soweit nichts vermerkt ist, beziehen sich die Angaben auf übliche Normalbedingungen, besonders auf Raumtemperatur. Die für die typisierten Isolierpreßstoffe, die Amino- und Phenoplaste u. a. festgelegten Mindestwerte sind in der Zahlentafel am Schlusse des Buches enthalten (vgl. auch S. 69).

<sup>1</sup> Engineering Bd. 142 (1936) S. 235. — HAASE: Z. Physik Bd. 18 (1937) S. 69.

<sup>2</sup> In der ausländischen Fachliteratur sind die Werte der Zahlentafel 8 vielfach in Einheiten angegeben, die auf das Zollsystem zurückgehen. Um eine bequeme Umrechnung zu ermöglichen, sind für die wichtigsten Werte die Umrechnungsfaktoren im folgenden aufgeführt.

Längenmaße:		Wärmeleitung:	
1 mil = $\frac{1}{1000}$ in	= 0,025400 mm	1 kcal/m h °C	= 2,78 · 10 <sup>-3</sup> gcal/cm s °C
1 foot	= 0,30480 m	1 gcal/cm s °C	= 360 kcal/m h °C
1 yard	= 0,91440 m	1 kcal/m h °C	= 4,186 · 10 <sup>3</sup> Joule/mh °C
Flächenmaße:		1 Joule/m h °C	= 0,2388 · 10 <sup>-3</sup> kcal/m h °C
1 sq. in.	= 6,45159 qcm	1 kcal/m h °C	= 8,065 BTU in/sq. ft h °F
1 circ. in.	= 5,0671 qcm	1 BTU in/sq ft h °F	= 0,124 kcal/m h °C
1 sq. foot	= 0,09290 qm	1 kcal/m h °C	= 0,6711 BTU/ft h °F
1 sq. yard	= 0,83613 qm	1 BTU/ft h °F	= 1,49 kcal/m h °C
Hohlmaße:		1 Joule/mh °C	= 0,160 · 10 <sup>-3</sup> BTU/ft h °F
1 cubic inch	= 16,3870 ccm	1 BTU/ft h °F	= 6,234 · 10 <sup>3</sup> Joule/m h °C
Gewichte:		1 Joule/m h °C	= 1,925 · 10 <sup>-3</sup> BTU in/sq ft h °F
1 ounce (avoir)	= 28,350 g	1 BTU in/sq ft h °F	= 519,5 Joule/m h °C
1 pound (avoir)	= 0,45359 kg	Arbeitseinheiten:	
1 kg	= 2,205 pounds	1 cmkg	= 0,07233 ft lb.
1 ton	= 1,01604 Tonnen	1 ft lb	= 13,826 cmkg
1 Tonne	= 1000 kg = 0,9842 tons	1 ft lb/sq in	= 2,143 cmkg/cm <sup>2</sup>
1 short ton	= 2000 lbs = 0,9072 Tonnen	1 cmkg/cm <sup>2</sup>	= 0,4666 ft lb/sq in
Abgeleitete Einheiten:		Elektrische Festigkeit:	
1 pound/sq. in	= 0,070307 kg/cm <sup>2</sup>	1 V/mil	= 39,4 V/mm
1 kg/cm <sup>2</sup>	= 14,2233 pounds/sq.in.	1 kV/mm	= 25,4 V/mil
1 ton/sq. in.	= 1,575 kg/mm <sup>2</sup>		
1 kg/mm <sup>2</sup>	= 0,6349 tons/sq. in.		

# Keramische Isolierstoffe.

Von W. WEICKER, Hermsdorf (Thür.).

## Einleitung.

Bereits in der ersten Vortragsreihe „Isolierstoffe der Elektrotechnik“, die im Winter 1920/21 von dem Elektrotechnischen Verein und der Technischen Hochschule, Berlin, veranstaltet worden ist, hatte der Verfasser die keramischen Isolierstoffe zu behandeln gehabt. Daher liegt es nahe, diesmal zunächst einen Vergleich zwischen dem damaligen und dem heutigen Stande der Keramik zu ziehen. Und in der Tat: Welche gewaltigen Veränderungen und Fortschritte haben sich in dieser verhältnismäßig kurzen Zeitspanne vollzogen! Damals konnte und mußte unter „keramischen Isolierstoffen der Elektrotechnik“ ausschließlich Porzellan verstanden werden, da andere keramische Baustoffe, wie Steatit, noch eine ziemlich untergeordnete Rolle spielten. Wie ganz anders jetzt! Heute gehören zu den keramischen Isolierstoffen neben dem altbewährten Hartporzellan eine ganze Reihe von Sondermassen, die besonders für Zwecke der Hochfrequenztechnik und Elektrowärmetechnik außerordentliche Bedeutung erlangt haben.

Doch auch nach anderer Richtung ist die Entwicklung der letzten Jahre gekennzeichnet: Waren damals der Herstellungsmöglichkeit von Porzellanisolatoren sowohl in bezug auf äußere Abmessungen als auch in bezug auf erreichbare Wandstärke noch ziemlich enge Grenzen gesteckt, so gibt es heute für die Größe der Stücke in der Hochspannungstechnik kaum noch eine obere Grenze. Einteilige Isolatoren bis zu fast 3 m Höhe und selbst massive, sog. Vollkernisolatoren fast beliebiger Wandstärke können heute technisch ebenso beherrscht werden, wie die aus keramischen Sondermassen hergestellten kleinsten Teile, z. B. die winzigen Kondensatoren aus Massen höchster Dielektrizitätskonstante, wobei eine erstaunlich hohe Genauigkeit im Kapazitätswert erreicht werden kann. Überhaupt ist es für die neuzeitliche Keramik kennzeichnend, daß infolge Anwendung von teilweise neuartigen Herstellungsverfahren bei diesen Sondermassen eine früher für ganz unmöglich gehaltene Maßhaltigkeit von weniger als 1% und durch Nachbearbeitung im fertiggebrannten Zustande, beispielsweise bei Rotationskörpern, eine Genauigkeit von  $\frac{1}{100}$  mm oder mehr erreicht werden kann.

Nach diesem allgemeinen Überblick ergibt sich zwanglos eine Unter-

teilung des Stoffes in das ursprüngliche Hartporzellan und weiter in eine Reihe keramischer Sondermassen. Es ist wohl das Verdienst des Verbandes Deutscher Elektrotechnischer Porzellanfabriken (VDEP), in mühevoller jahrelanger Arbeit erstmalig den Versuch einer nach einheitlichen Gesichtspunkten vorgenommenen Gruppeneinteilung der keramischen Werkstoffe für die Elektrotechnik durchgeführt zu haben. Das Ergebnis dieser 1935 vorläufig abgeschlossenen Arbeit ist die am Schlusse des Buches abgedruckte Übersichts- und Eigenschaftstafel keramischer Werkstoffe der Elektrotechnik<sup>1</sup>.

Man findet hier zunächst eine Unterteilung in fünf Hauptgruppen, die sich durch ihre Massezusammensetzung unterscheiden. In der zweiten Hauptquerspalte sind die richtunggebenden Eigenschaften aufgeführt, um sofort erkennen zu lassen, für welche Verwendungszwecke die Gruppen besonders geeignet sind. Dementsprechend sind in der dritten Querspalte die wichtigsten Anwendungsgebiete aufgezählt. So enthält beispielsweise Gruppe I die altbekannten Hartporzellane mit Tonsubstanz als überwiegendem Bestandteil, während Gruppe II die magnesiumsilikathaltigen Massen, also mit Speckstein oder Talkum als Hauptbestandteil, in sich schließt. Die bekanntesten Vertreter dieser Massen dürften wohl Steatit, Calit und Frequenta sein, die sich durch ihren geringen Verlustwinkel, hohe Maßhaltigkeit und große mechanische Festigkeit auszeichnen. Gruppe III bringt die rutilhaltigen Sondermassen, also die Massen mit Titanverbindungen, die unter den Namen Condensa und Kerafar bekannt sind. Hauptkennzeichen sind die auffallend hohe Dielektrizitätskonstante und der negative Temperaturkoeffizient der Dielektrizitätskonstante. In Gruppe IV sind ebenfalls dichte, sowohl Tonsubstanz, wie Speckstein enthaltende Massen, jedoch mit besonders kleinem Wärmeausdehnungskoeffizienten zusammengefaßt. Sie kommen wegen ihrer hohen Temperaturwechselbeständigkeit und Lichtbogenfestigkeit für Funken- und Lichtbogenschutz sowie für viele andere Zwecke, z. B. zum Aufbau temperaturunabhängiger Schwingungskreise, in Betracht, wo eine sehr geringe Temperaturabhängigkeit der Abmessungen Bedingung ist. Gruppe V endlich umfaßt die zum Teil recht verschiedenartig zusammengesetzten keramischen Massen vornehmlich für Zwecke der Elektrowärmetechnik. Hier kommt es auf größte Hitzebeständigkeit und guten Isolationswiderstand, dagegen nicht auf Durchschlagfestigkeit an, weshalb diese Massen in der Regel im Gegensatz zu allen anderen keramischen Massen der Elektrotechnik porös sein können.

Da in dem ersten Vortrag dieser Reihe<sup>2</sup> bereits Mikrostruktur und Zusammensetzung der verschiedenen keramischen Werkstoffe behandelt

<sup>1</sup> WEICKER, W., KUNSTMANN E. u. DEMUTH W.: ETZ Bd. 56 (1935) S. 915.

<sup>2</sup> EITEL, W.: Physikal. Grundlagen unter besonderer Berücksichtigung der anorganischen Isolierstoffe, S. 1 dieses Buches.



sind, wird hier von einem näheren Eingehen auf den chemischen Aufbau der keramischen Massen abgesehen und hauptsächlich die Herstellung und Verwendung der daraus gefertigten Isolierteile für die Elektrotechnik beschrieben. Allerdings mit einer Einschränkung: Die Gruppe V, also die Massen für Zwecke der Elektrowärmetechnik bleiben bei ihrer großen Bedeutung für die Technik einem besonderen Abschnitt vorbehalten<sup>1</sup>. An dieser Stelle sollen also nur die Massen der Gruppen I—IV besprochen werden, die ihrer geschichtlichen Entwicklung entsprechend in zwei Hauptabschnitte zu gliedern sind, nämlich in Hartporzellan und keramische Sondermassen.

## I. Hartporzellan.

Über das Hartporzellan liegt ein umfangreiches, über viele Jahre bis in die neueste Zeit reichendes Schrifttum vor. U. a. sei auf das Buch von SCHERING „Die Isolierstoffe der Elektrotechnik“ mit der ersten Vortragsreihe von 1920/21 verwiesen. In diesem Buche sind in dem Abschnitt „Keramische Isolierstoffe“ bereits ausführlich Zusammensetzung, Verarbeitung und Brennen des Porzellans, ferner seine Eigenschaften und seine Verwendung für Nieder- und Hochspannungszwecke sowie endlich die Prüfung der Hochspannungsisolatoren behandelt worden. Es genügt daher hier, zunächst einen kurzen Rückblick auf den damaligen Stand zu geben und anschließend die inzwischen in der Anwendung des Hartporzellans gemachten Fortschritte aufzuzeigen.

Zunächst einige Worte über die Herstellung: Allbekannt ist die Zusammensetzung des Porzellans aus den drei Bestandteilen Kaolin, Feldspat und Quarz, durch deren Mischungsverhältnis man bis zu einem gewissen Grade die Haupteigenschaften des Porzellans, insbesondere seine mechanische Festigkeit und Hitzebeständigkeit beeinflussen kann. Ausdrücklich sei jedoch betont, daß es natürlich unmöglich ist, mit ein und demselben Versatz nun Bestwerte aller in Betracht kommenden Eigenschaften zu erzielen. Es bleibe aber auch nicht unerwähnt, daß es in neuerer Zeit gelungen ist, selbst hochwertiges Hartporzellan ausschließlich aus deutschen Rohstoffen, also besonders ohne die früher für unentbehrlich gehaltenen ausländischen Feldspate und Kaoline herzustellen. Die Herstellungsverfahren selbst sind bei Hartporzellan nahezu die gleichen geblieben, wie schon vor Jahrzehnten. Man unterscheidet also nach wie vor als Hauptverfahren: Drehen, Strangpressen (früher Ziehen genannt), Gießen und Pressen (früher fälschlich Stanzen genannt)<sup>2</sup>.

<sup>1</sup> FISCHER, W.: Isolierstoffe in der Elektrowärmetechnik, S. 251 dieses Buches.

<sup>2</sup> Wegen Einzelheiten sei auf das vom Deutschen Ausschluß für Technisches Schulwesen (DATSCH) gemeinsam mit dem VDEP herausgegebenen Blatt: „Elektroporzellan“ hingewiesen (1930).

Das Drehverfahren, und zwar sowohl das Eindrehen in Gipsformen wie das sog. Freidrehen, kann als bekannt vorausgesetzt werden. Vielfach verbessert ist das Gießverfahren, nach welchem unter Verwendung von Einlegekernen selbst schwierige Gegenstände hergestellt werden können. Kaum etwas Neues ist über das Naßpressen der vielgestaltigen Installationsteile in Stahlmatrizen zu berichten. Hierzu wird die Porzellanmasse in ziemlich trockenem pulverisiertem Zustand (weshalb dieses Verfahren im englischen dry-process genannt wird, was gelegentlich zu Verwechslungen mit dem später unter „Sondermassen“ noch zu besprechenden „Trockenpressen“ geführt hat) mit Wasser und Öl vermengt und dann unter ziemlich hohem Druck in die Stahlmatrize gepreßt. Diese aus Unter- und Oberstempel bestehenden Matrizen müssen entsprechend der oft sehr verwickelten Form der Preßlinge mit besonderer Genauigkeit und Sorgfalt angefertigt werden. Dabei kann der Konstrukteur neu zu entwerfender Porzellanpreßkörper sich und der Porzellanfabrik oft Kosten und Ärger ersparen, wenn er schon bei dem Entwurf des Preßlings auf die Eigenheiten des keramischen Preßvorganges Rücksicht nimmt. Auf Einzelheiten kann natürlich nicht eingegangen werden, doch seien Interessenten auf ein 1936 vom VDEP herausgegebenes Heft „Mehr keramische Isolierstoffe“ und die dort auf S. 19—22 abgedruckten Konstruktionsbeispiele „falsch — richtig“ hingewiesen.

Alle nach diesem Naßpreßverfahren hergestellten Porzellanisolierteile sind, was nochmals hervorgehoben sei, den nach dem Dreh- und Gießverfahren hergestellten Teilen sowohl in elektrischer wie in mechanischer Hinsicht unterlegen. Naßgepreßte Porzellanteile sollten deshalb grundsätzlich nicht für Hochspannungszwecke verwendet werden. Dieser Unterschied in den Eigenschaften der Anwendungsmöglichkeiten geht auch aus der am Schlusse dieses Buches abgedruckten Eigenschaftstafel deutlich hervor, der zufolge gepreßtes Porzellan nach Gruppe Ic in den meisten maßgebenden Eigenschaften um rd. ein Drittel ungünstiger liegt als gedrehtes und gegossenes Porzellan nach den Gruppen Ia und Ib.

Ganz gleich, nach welchem Verfahren die Isolatoren hergestellt sind, sie müssen zunächst bei Raumtemperatur oder in besonderen Trockenkammern getrocknet, dann glasiert und endlich bei rd. 1400° gebrannt werden, wozu entweder Rundöfen oder Tunnelöfen dienen. Bei der Trocknung und Sinterung im Glattbrand erfährt das Porzellan die ihm eigentümliche große Schwindung, die bis zu 20% betragen kann und der Hauptgrund für die bei allen keramischen Gegenständen unvermeidlichen Maßabweichungen ist. Über die Unterteilung dieser Maßabweichungen in Grob-, Mittel- und Feintoleranz und die einzuhaltenden Abmaße gibt die auf S. 17 und 18 des oben erwähnten Heftes abgedruckte Toleranztafel nach DIN VDE 680 näheren Aufschluß.

Besonders empfindliche, vor allem gegossene schwachwandige Isola-

toren sowie alle nach dem Preßverfahren hergestellten und daher etwas fetthaltigen Stücke werden vor dem eigentlichen Glattbrand und vor dem Glasieren einem Vorbrande, dem Glühbrand, bei 800 . . . 900° unterworfen, durch den die Stücke schon in diesem Zwischenzustand fester werden. Die Glasur, eine durch Flußmittel leicht schmelzend gemachte Mischung porzellanähnlicher Rohstoffe schmilzt im Glattbrand und überzieht dabei den Porzellankörper mit der bekannten außerordentlich dünnen glasartigen Schicht, die ihm das gefällige äußere Ansehen verleiht und ihn auch bis zu einem gewissen Grade gegen Verschmutzung schützt. Keinesfalls dagegen soll die Glasur, wie gelegentlich heute noch behauptet wird, dazu dienen, Poren zu schließen und das Eindringen von Feuchtigkeit zu verhindern. Für deutsches Porzellan wenigstens trifft diese Behauptung nicht zu. Gutes deutsches, nach dem Dreh- oder Gießverfahren hergestelltes Porzellan ist auch ohne Glasur völlig unporös und könnte tagelang unter Wasser, sogar unter hohem Druck gehalten werden, ohne daß auch nur Spuren von Feuchtigkeit eindringen<sup>1</sup>.

Daß dagegen die Glasur in mechanischer Hinsicht von gewissem Vorteil sein kann und besonders die Festigkeit von auf Zug oder Biegung beanspruchten Isolatoren bei richtiger Zusammensetzung wesentlich erhöhen kann, ist erst eine neuere Erkenntnis<sup>2</sup>. Wie groß die erreichbaren Unterschiede sind, ist aus der Eigenschaftstafel am Schlusse des Buches in den Querspalten 5, 6 und 7 ersichtlich, wo für Zug-, Druck- und Biegefestigkeit zwei verschiedene Werte, nämlich für glasiertes und unglasiertes Porzellan, angegeben sind.

Bei den übrigen Eigenschaften von Hartporzellan soll nur auf wenige Gesichtspunkte eingegangen werden. Für die Bestimmung der Durchschlagfestigkeit sei auf die Bedeutung der richtigen Form der Prüfkörper hingewiesen, da man ohne genau definierte Feldstärke natürlich keinen eindeutigen Wert für die Durchschlagfestigkeit erhalten kann<sup>3</sup>.

Ferner ist bei den vom VDE bzw. der DKG vorgeschriebenen einfachen Prüfkörpern noch zu beachten, daß die an derartigen Körpern bestimmter Form und Größe, also mit im allgemeinen verhältnismäßig kleinen Abmessungen, festgestellten Werte der elektrischen wie auch der mechanischen Festigkeit nicht ohne weiteres auf größere, vielleicht ganz anders gestaltete Körper übertragen werden können. Es sei dies hier ausdrücklich betont, da die Außerachtlassung dieser Tatsache allzuhäufig zu Mißverständnissen und Fehlkonstruktionen geführt hat.

Als allen keramischen Werkstoffen eigentümliche Eigenschaften seien

<sup>1</sup> Vgl. VDE-Leitsätze 0446 § 12.

<sup>2</sup> HANDREK, H.: Hescho-Mitt. 1926 Heft 29/30 S. 25; 1928 Heft 39 S. 13. — ROWLAND, D. H.: Gen. Electr. Rev. März 1929 S. 136; Electr. Engng. Bd. 55 (1936) S. 618.

<sup>3</sup> Vgl. VDE-Leitsätze 0303 § 20.

noch ihre hohe Kriechstromfestigkeit, ihre Feuchtigkeitssicherheit, ihre Hitzebeständigkeit und Unverbrennbarkeit hervorheben.

Bei der Besprechung der Eigenschaften von Porzellan ist einer Erscheinung noch zu gedenken, die erst seit einigen Jahren in beteiligten Fachkreisen lebhafter erörtert worden ist, nämlich die Frage etwaiger Ermüdung oder Alterung von keramischen Werkstoffen. Man muß dabei streng zwischen einer Alterung oder zeitlichen Veränderung des Werkstoffes, also des Porzellans an sich auf der einen Seite, und des zusammengebauten Isolators auf der anderen Seite unterscheiden. In beiden Fällen ist ferner das Verhalten des unbeanspruchten Werkstoffes oder Isolators einerseits und die etwaige Festigkeitsverminderung infolge mechanischer Dauerbeanspruchung andererseits auseinander zu halten. Was das Porzellan selbst anbetrifft, so ist wohl unbestritten, daß es keinerlei zeitlichen Veränderungen seiner Struktur unterworfen ist. Doch auch die dynamische Wechselfestigkeit bei Zug-, Biege- und Torsionsbeanspruchung liegt bei Porzellan im Gegensatz zu Metallen nur wenig unter seiner statischen Festigkeit<sup>1</sup>. Das Porzellan selbst unterliegt also kaum einer Ermüdung bei Dauerbeanspruchung.

Streng hiervon zu unterscheiden ist das Verhalten der meist in Verbindung mit anderen Werkstoffen zusammengebauten Isolatoren. Hier spielen die verschiedenen Eigenschaften, insbesondere die voneinander abweichenden Wärmeausdehnungskoeffizienten der miteinander vereinigten Werkstoffe, also z. B. Porzellan, Metallarmatur und Verbindungsmittel sowie etwaige Quellung des Kittes bei Feuchtigkeitsaufnahme eine entscheidende Rolle.

Nur nebenbei erwähnt wurde bisher eine sehr wichtige Eigenschaft keramischer Werkstoffe, nämlich ihre unbedingte Beständigkeit gegen Chemikalien aller Art (ausgenommen Flußsäure). Dieses Verhalten bedingt ihre unbestrittene Überlegenheit für die Verwendung im Freien.

### Freileitungsisolatoren.

Da hierüber ein ziemlich umfangreiches Sonderschrifttum besteht<sup>2</sup>, so seien hier nur die seit der ersten Vortragsreihe (vgl. S. 121) eingetretenen Änderungen und Fortschritte hervorgehoben.

Über Schwachstromisolatoren für Fernmeldeleitungen und Niederspannungsstarkstrom-Isolatoren ist nichts Neues zu sagen, da beide schon längere Zeit genormt sind und sich gut bewährt haben. Etwas anders verhält es sich mit den Hochspannungsisolatoren. Hier wurden 1920 die Deltaisolatoren als Reihen HD 6 . . . 35 genormt (Abb. 79 links),

<sup>1</sup> ESAU-HEUMANN: Elektrizitätswirtsch. Bd. 31 (1932) S. 150. — HEUMANN, F.: Diss. 1933. Berlin: VDI-Verlag.

<sup>2</sup> Vgl. die Zusammenstellung auf S. 153 dieses Buches.

zu denen später noch die Weitschirmisolatoren (Reihen HW 6 ... 35) kamen (Abb. 79 rechts).

Einen wichtigen Fortschritt bedeutete die seit 1925 mit Erfolg durchgeführte Schaffung der sog. „verstärkten Delta- und Weitschirmisolatoren“ (Reihen VHD und VHW), die sich bei gleicher Schlagweite dadurch von den älteren Stützen-Isolatoren unterscheiden (Abb. 80), daß das Stützenloch schon unterhalb des Isolatorkopfes endet. Hierdurch wird dieser zwar etwas auf Biegung beansprucht, gewinnt aber außerordentlich an Durchschlagsicherheit, nachdem es der deutschen Porzellan-

industrie gelungen war, die verhältnismäßig große Wandstärke im Kopf spannungsfrei und unbedingt dicht herzustellen. Während die letztgenannte Isolatorreihe nur einteilig, also aus einem einzigen Stück bestehend, ausgeführt wird, werden die Isolatoren der beiden anderen Reihen (also HD und HW) sowohl einteilig wie auch mehrteilig hergestellt. Die Vereinigung der beiden Teile kann dabei auf verschiedene Weise, z. B. mittels Hanf oder Kitt, erfolgen. Es muß dabei nur dafür gesorgt werden, daß die Verbindung der einzelnen Teile nicht starr, sondern

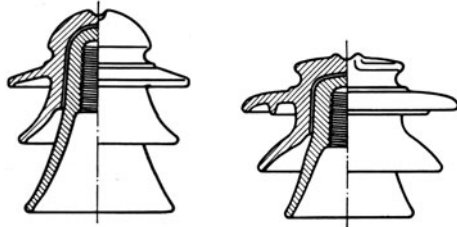


Abb. 79. Genormte Stützenisolatoren der Reihen HD und HW.

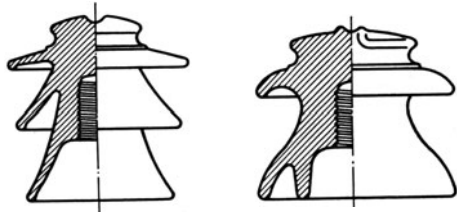


Abb. 80. Genormte Stützenisolatoren der verstärkten Reihen VHD und VHW.

nachgiebig ist, um innere Materialspannungen zu vermeiden, die durch die verschiedene Wärmeausdehnung der miteinander vereinigten Werkstoffe und durch Quellung des Kittes nur zu leicht hervorgerufen werden und früher zu verheerenden Störungen starr gekitteter Stützenisolatoren geführt haben. Demgegenüber liegen mit nachgiebig gekitteten Stützenisolatoren, die bis 60 000 V Betriebsspannung in großen Mengen schon vor 15—20 Jahren eingebaut worden sind, die günstigsten Betriebserfahrungen vor, obwohl oder vielmehr weil die einzelnen Teile wegen des zwischen Porzellan und Zement zwischengeschalteten nachgiebigen Schutzanstrichs nur ziemlich lose miteinander verbunden waren.

Außer den genormten Isolatoren der Delta- und Weitschirmreihen seien unter den Stützenisolatoren noch die *Massiv-Stützenisolatoren* nach Abb. 81 erwähnt, die infolge ihres nahezu gleichgroßen Durchschlag- und Überschlagweges als völlig durchschlagsicher gelten können und nur

den Nachteil geringerer mechanischer Belastbarkeit gegenüber den anderen Stützenisolatoren haben.

Neben den Stützenisolatoren haben die Hänge- oder Kettenisolatoren im Laufe der Jahre eine immer größere Bedeutung erlangt. Auf die grundsätzlichen Vorzüge der Kettenisolatoren sei an dieser Stelle nicht nochmals eingegangen; vielmehr mögen nur die einzelnen Bauarten kurz behandelt werden. Unter diesen kann man die in Abb. 82 dargestellten drei Hauptarten unterscheiden, nämlich in der Reihenfolge ihrer

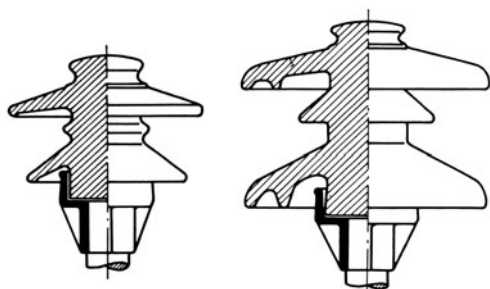


Abb. 81. Massiv-Stützer (durchschlagsichere Freileitungs-Isolatoren). Links: für 15 kV, rechts: für 35 kV. (Maßstab etwa 1:10).

Entstehung: die Schlingen- (Hewlett-) Isolatoren, die Kappenisolatoren und die Vollkernisolatoren. Sehr interessant ist es, die Entwicklung dieser Isolatoren im Laufe der Jahre zu verfolgen, wobei die einzelnen Länder teilweise ganz verschiedene Wege gegangen sind. In Amerika entstanden, sind die Hewlett-Isolatoren hier doch

gegenüber den Kappenisolatoren immer mehr zurückgetreten. In Deutschland, wie auch im übrigen Europa, sind mit ihnen im Betrieb wohl auch nicht einheitliche Erfahrungen gemacht worden: sie neigen wegen ihrer glatten Oberfläche zwar weniger zu Verschmutzung und bewährten sich in manchen Anlagen recht gut. In anderen Anlagen haben sie sich aber als nicht genügend durchschlagssicher gezeigt. Weitere Gesichtspunkte, die gegen Schlingenisolatoren sprechen, sind ihre große Baulänge und ihre geringe Stoßdurchschlagfestigkeit. Auch die ursprünglich als Hauptvorzug gerühmte Eigen-

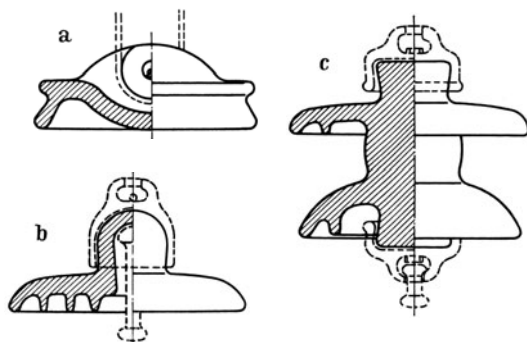


Abb. 82. Die drei Hauptarten von Kettenisolatoren. a) Schlingen- (Hewlett-) Isolator. b) Kappen-Isolator. c) Vollkern- (Motor-) Isolator.

schaft, daß nämlich wegen der gegenseitigen Umschlingung der Verbindungsschleifen ein Herabfallen der Leitung unmöglich sei, hat sich bei Kurzschlüssen doch nicht als zutreffend erwiesen. Hierzu kommt noch die Gefahr von Ermüdungsbrüchen der Seilschlingen infolge

Leitungsschwingungen. Aus all diesen Gründen sind Hewlett-Isolatoren in Deutschland bei der Normung seinerzeit unberücksichtigt geblieben und werden wohl auch kaum noch eingebaut.

Bei den Kappenisolatoren, die fast gleichzeitig in Amerika und in Deutschland entstanden, ist die weitere Entwicklung in beiden Ländern recht verschieden verlaufen. Zunächst hinsichtlich der äußeren Abmessungen, d. h. Tellerdurchmesser und Baulänge, vor allem aber hinsichtlich der inneren Durchbildung. Während man in Amerika nach den ersten Mißerfolgen mit starrgekitteten Isolatoren seit etwa 1913 zu nachgiebig gekitteten Isolatoren übergang und die geringere mechanische Haftfestigkeit des Klöppels erforderlichenfalls durch Parallelschaltung von zwei oder mehr Gliedern ausglich, ging man in Deutschland, wo die Mißerfolge mit den ursprünglich starr gekitteten Isolatoren abschreckten und das Vertrauen zu nachgiebig gekitteten Isolatoren fehlte, zu kittlosen Kappenisolatoren, d. h. Isolatoren mit meist eingeleitem Klöppel über und suchte gleichzeitig die mechanische Festigkeit in oft übertriebener Weise zu steigern. Die Folge waren häufig Ausfälle im Betrieb. Die Ursachen scheinen darin zu beruhen, daß der Isolator entweder durch zu hohe Vorprüfbelastung oder auch durch den heißen Bleieinguß schon vorbeschädigt worden war, d. h. feinste Einrisse erhalten hatte, die infolge der mechanischen Dauer-Wechselbeanspruchung im Betrieb allmählich immer größer wurden und so den inneren Isolationswiderstand verminderten. Die näheren Gründe dieser inneren Veränderungen sind zur Zeit noch Gegenstand eingehender Untersuchungen an verschiedenen Forschungsstellen. Dabei muß genau wie bei den Stützenisolatoren nachdrücklich darauf hingewiesen werden, daß im Gegensatz zu starr gekitteten Kappenisolatoren sich nachgiebig gekittete oder auf andere Weise, auch ohne Blei, zusammengebaute Kappenisolatoren selbst bei sehr langer Betriebszeit auf das beste bewährt haben<sup>1</sup>.

Immerhin können Kappenisolatoren, gleichgültig welcher Form und Bauart, selbstverständlich nie als absolut durchschlagsicher angesprochen werden. Demgegenüber steht die unbedingte Durchschlagsicherheit des Vollkernisolators, also der dritten Grundform von Kettenisolatoren, außer Frage, und die ursprünglich gehegten Bedenken, nämlich, daß diese Isolatoren nicht genügend bruchsicher seien und die Leitung herunterfallen könnte, haben sich in der Praxis nicht als ausschlaggebend erwiesen.

Nachdem etwa 1912 Porzellan erstmalig in den von der Gesellschaft für drahtlose Telegraphie System Telefunken, insbesondere von W. DEMUTH für Zwecke der drahtlosen Telegraphie entwickelten

---

<sup>1</sup> BORQUIST, W.: Tekn. T. 1936 Nr. 8 S. 125; weiteres Schrifttum S. 153.

Knüppelisolatoren bewußt auf Zug beansprucht worden war, hat die Weiterentwicklung dieser Vollkern- (Motor-) Isolatoren für die Isolierung hochgespannten Wechselstroms in der Folgezeit<sup>1</sup>, besonders aber seit ihrer Normung durch den VDE im Jahre 1929, außerordentliche Fortschritte gemacht. Jedenfalls haben diese Isolatoren in den letzten Jahren, vor allem in Deutschland und der Schweiz, immer größere Verbreitung gefunden. Voraussetzung ist allerdings eine genügend hohe mechanische Vorprüflast, die hier an die Stelle der elektrischen Stückprüfung bei Kappenisolatoren tritt.

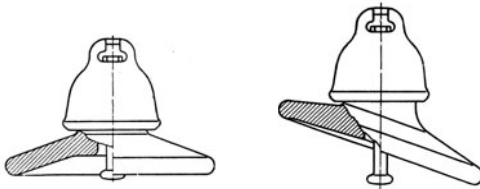


Abb. 83. Sonderbauarten von Kettenisolatoren gegen lose haftenden Schmutz.

Schon hier sei erwähnt, daß gerade für Vollkernisolatoren neben Porzellan auch Steatit nach Gruppe II<sup>1</sup> (vgl. S. 145) vorteilhaft verwendet werden kann.

Ganz besonders haben sich Vollkernisolatoren in Deutschland als Klein-Kettenisolatoren bewährt. Hier ist ihre große Gewittersicherheit, also ihr günstiges Verhalten gegenüber Spannungsbeanspruchungen stoßartigen Verlaufs hervorzuheben.

Wenn somit der Gesichtspunkt der unbedingten oder wenigstens sehr hohen Durchschlagsicherheit der Freileitungsisolatoren heutzutage im

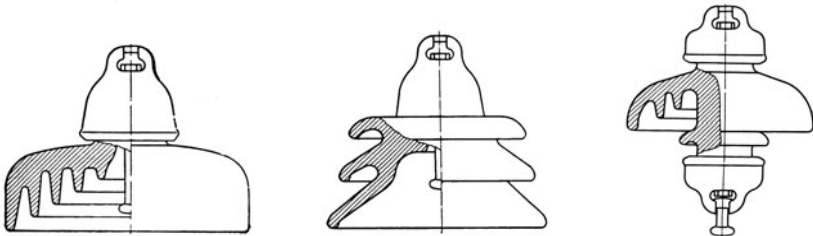


Abb. 84. Sonderbauarten von Kettenisolatoren gegen festhaftenden Schmutz.

Interesse größter Betriebssicherheit der Leitung wohl als Hauptforderung aufgestellt zu werden pflegt, so kommt nach den Erfahrungen der letzten Jahre hierzu noch ein weiterer wichtiger Gesichtspunkt, nämlich die Sicherheit gegen Überschläge bei starker Verschmutzung und Nebel. Auf die zum Schutze gegen diese Einflüsse entwickelten Sonderkonstruktionen, von denen die Abb. 83 und 84 einige Beispiele zeigen, sei nicht im einzelnen eingegangen<sup>2</sup>. Vielmehr seien nur aus den an ver-

<sup>1</sup> WEICKER, W. Geschichtliche Einzeldarstellungen der Elektrotechnik, Bd. III, Berlin 1932, S. 56 f.

<sup>2</sup> MÜLLER, H.: Hescho-Mitt. H. 56. — OBENAU, F.: Hescho-Mitt. H. 64/65 u. 70.



schiedensten Stellen<sup>1</sup> gemachten Erfahrungen folgende Schlußfolgerungen hervorgehoben:

1. Eine für alle Betriebsverhältnisse gleich gute Sonderbauart verschmutzungssicherer Isolatoren gibt es nicht. Es kann also nur mit Vorsicht von dem guten Verhalten einer bestimmten Isolatorart in der einen Anlage auf eine andere Anlage mit vielleicht ganz anderen Betriebsverhältnissen geschlossen werden.

2. Recht gut haben sich in den meisten Fällen die horizontalhängenden, also der reinigenden Wirkung von Regen und Wind besonders stark ausgesetzten Abspann-Isolatoren verhalten, wie überhaupt der natürlichen Reinigung der Isolatoren durch Witterungseinflüsse ziemlich große Bedeutung zuzukommen scheint.

3. Bei schwierigen Betriebsverhältnissen wird man selbst bei Sondertypen nicht ohne regelmäßige künstliche Reinigungen auskommen, deren zeitlicher Abstand allerdings entsprechend groß gewählt werden kann.

Falls an stark verschmutzten Isolatoren bei sehr nebligem Wetter oder auch an sauberen Isolatoren bei hohen Überspannungen doch Überschläge über die Isolatorenmäntel auftreten sollten, ist es natürlich erwünscht, wenigstens eine Beschädigung des Isolators durch die Hitzewirkung des

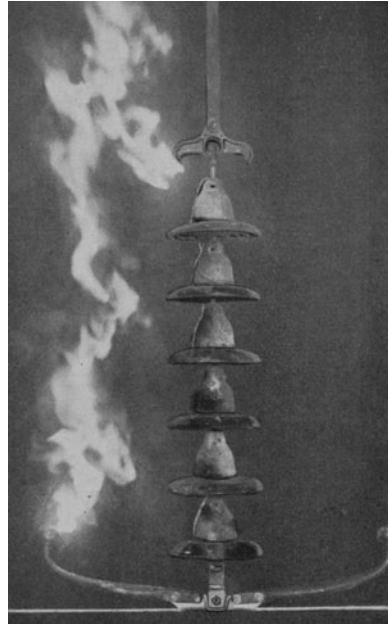


Abb. 85. Lichtbogenüberschlag an einer Kette mit Schutzarmaturen.

Erdschluß- oder Kurzschlußlichtbogens zu verhüten. Dies geschieht in recht wirksamer Weise durch den Einbau von Schutzarmaturen, die, am oberen oder unteren Ende einer Hängekette eingebaut, gewissermaßen eine Nebenschluß- oder Schutzfunkenstrecke bilden. Bei der Gestaltung derartiger Armaturen muß besonders darauf geachtet werden, daß der Lichtbogen, selbst wenn er, wie bei verschmutzten Isolatoren in der Regel, sich längs der Isolatoroberfläche ausgebildet hat, möglichst rasch auf die danebenliegende Schutzfunkenstrecke überspringt. Natürlich muß die betriebsfrequente Überschlagspannung der

<sup>1</sup> Vgl. u. a. W. J. JOHN u. F. M. SAYERS: J. Instn. electr. Engrs. Bd. 77 (1935) S. 629. — J. S. FORREST, J. Instn. electr. Engrs. Bd. 78 (1936) S. 401.

Schutzarmaturen immer noch genügend hoch über der Betriebsspannung liegen, um ein ungewolltes Ansprechen im Betrieb mit Sicherheit zu vermeiden. Abb. 85 zeigt die Wirkung einer derartigen Schutzfunkenstrecke an einer mehrgliedrigen Kette.

Auch zum Schutze der Leitung gegen Abbrand haben sich Schutzarmaturen recht wirksam erwiesen. Der früher oft betonte Nutzen für die Verbesserung der Spannungsverteilung längs der Glieder längerer Isolatorenketten scheint dagegen ziemlich bedeutungslos zu sein, da kurz vor dem Überschlag ohnehin ein selbsttätiger Spannungsausgleich eintritt<sup>1</sup>.

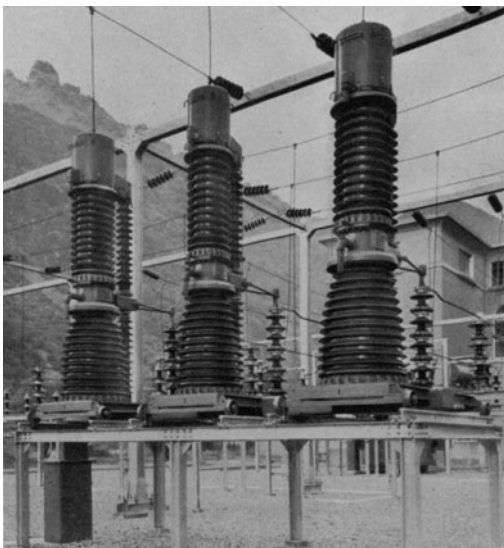


Abb. 86. Dreipolige Schaltergruppe für 135 kV.

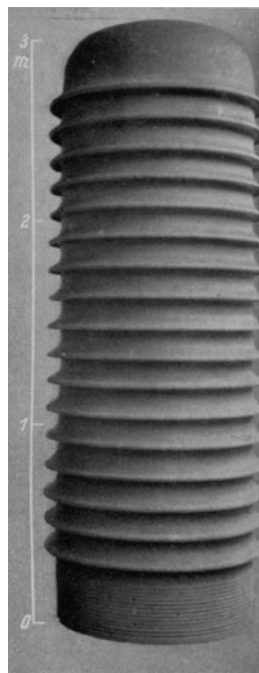


Abb. 87. Einteiliger Porzellanüberwurf für 220 kV, ungebrannt.

Endlich sei eines erst in allerletzter Zeit beachteten Gesichtspunktes für die Formgebung von Hochspannungsisolatoren gedacht, nämlich der Gefahr von Rundfunkstörungen.<sup>2</sup> Diese sind immerhin dann möglich, wenn am Isolator besonders in engen Zwischenräumen zwischen Porzellan und Leitungsdraht oder Armatur Glimmentladungen auftreten, die als Erreger hochfrequenter Wellen wirken. Eine leitende Überbrückung dieser Hohlräume, etwa dadurch, daß der Porzellankörper an der be-

<sup>1</sup> Vgl. u. a. OBENAU, F.: Hescho-Mitt. Heft 73 (1936) S. 17.

<sup>2</sup> DENNHARDT, A.: Elektrizitätswirtsch. Bd. 34 (1935) S. 15. — VIEWEG, R.: ebenda S. 19. — CONRAD: Telegr.- u. Fernspr.-Techn. (1936) S. 326.

treffenden Stelle wetterbeständig metallisiert wird, hat sich als bestes Hilfsmittel erwiesen. Bei bestimmten Isolatorformen, wie insbesondere bei den Vollkern-Stützen- oder Hängeisolatoren mit verhältnismäßig kleinen Feldstärken an den Armaturen sind übrigens erfahrungsgemäß besondere Abhilfsmaßnahmen entbehrlich.

Außer für Freileitungsisolatoren wird Porzellan in großem Umfange auch für Schalt- und Umspannwerke, so vor allem als Stützer, für Wand- und Apparatedurchführungen, Stromwandler u. dgl. verwendet. Soweit es sich dabei um Freiluftanlagen han-

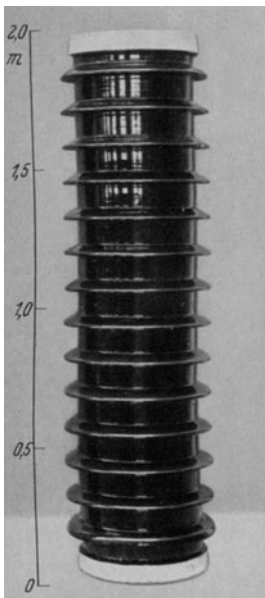


Abb. 88. Überwurf für 220 kV-Kondensatoren.

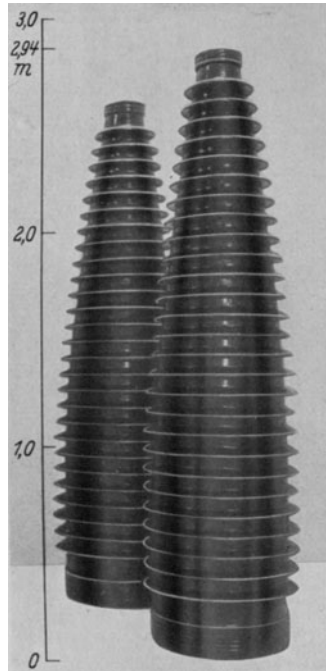


Abb. 89. Überwurf für 220 kV-Durchführungen.

delt, kommen sogar keramische Baustoffe wegen ihrer unbedingten Wetterbeständigkeit allein in Frage.

Auf die in Form und Zusammenbau außerordentlich mannigfaltigen Konstruktionen von derartigen Apparateisolatoren kann hier nicht näher eingegangen werden. Einige Beispiele besonders großer oder schwieriger Ausführungen mögen genügen. So wurden beispielsweise ziemlich große Porzellanteile für eine Konvektor-Schalter-Gruppe für 135 kV Betriebsspannung verwendet (Abb. 86). Ein besonders großer einteiliger, noch nicht gebrannter Porzellanüberwurf, der für ölfüllte Durchführungen in 220 kV-Transformatoren von 60 000 kVA-Leistung bestimmt ist und

in gebranntem Zustand eine Höhe von 2,5 m und einen Durchmesser von fast 1 m besitzt, ist in Abb. 87 dargestellt. Abb. 88 zeigt einen Porzellanüberwurf für 220 kV-Kondensatoren aus Hartpapier, um diese gegen die

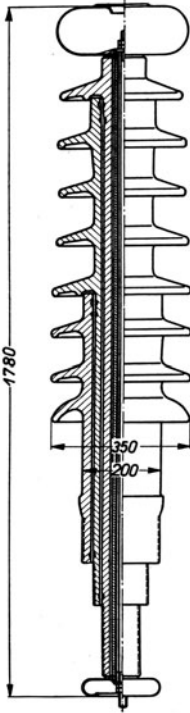


Abb. 90. Mehrrohrdurchführung für 100 kV.

Einflüsse der Witterung zu schützen. Weitere Beispiele großer Porzellanstücke sind Stützer bzw. Überwürfe von fast 3 m Höhe und 0,77 m größtem Durchmesser (Abb. 89) und große ölgefüllte Porzellandurchführungen. Diente bei den bisher genannten und vielen ähnlichen Isolatoren der keramische Werkstoff entweder nur als Behälter für die Ölfüllung bzw. bei den Stützern gewissermaßen als Abstandhalter, so sind in den letzten Jahren auch Porzellan-Durchführungen mit bestem Erfolg entwickelt worden, bei denen die Durchschlagbeanspruchung ausschließlich von Porzellan aufgenommen wird. Es sind dies die sog. Mehrrohrdurchführungen, bei denen, wie schon der Name andeutet, 2, 3 oder 4 teils glatte, teils mit Schirmen versehene Porzellanrohre ineinandergeschoben und durch ein wetter- und ölbeständiges Bindemittel oder auf andere Weise miteinander vereinigt werden (Abb. 90).

### Weitere Verwendungsbeispiele.

Besonders schwer herstellbare, gegossene Porzellan-Isolierkörper zeigt Abb. 91. Diese Porzellankörper sind für Querloch-Stromwandler bestimmt und bilden mit ihrer hohen elektrischen und mechanischen Beanspruchung ein Musterbeispiel für die fertigungstechnische Leistungsfähigkeit der Porzellanindustrie.

Auch die in Abb. 92 gezeigten Trockenspannungswandler stellen hohe Anforderungen an die Herstellungstechnik.

Als letztes Beispiel der Anwendung von Porzellan für besonders große und schwierige Isolierkörper seien die Porzellankondensatoren für Zwecke der leitungsgerichteten Hochfrequenztelephonie erwähnt (Abb. 93). Sie zeichnen sich besonders dadurch aus, daß der

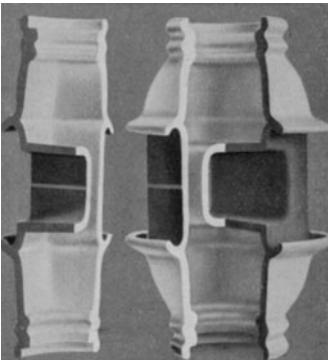


Abb. 91. Gegossener Querlochkörper für einen Durchführungs-Stromwandler.

untere, innen und außen metallisierte, etwa 25 mm dicke Porzellanteil als Kondensator von beträchtlicher Kapazität (etwa 1000 oder 2000 pF) dient und dabei im Betrieb mit rd. 60 000 V beansprucht wird), also

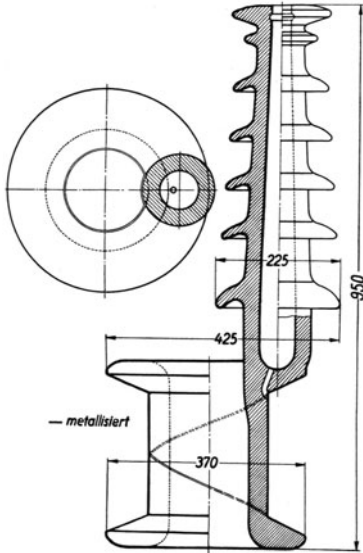


Abb. 92. Einteiliger Isolierkörper für Trockenspannungswandler.

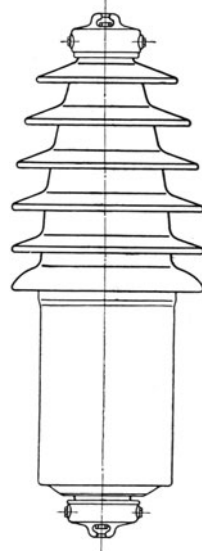


Abb. 93. Hochspannungs-Porzellan-Kondensator, einteilig.

vorher mit dem mehrfachen Betrag dieser Spannung geprüft werden muß. Dabei ist zu berücksichtigen, daß die auf Durchschlag beanspruchte Fläche bei dieser Type etwa 13000 cm<sup>2</sup> beträgt, also rd. 50 mal so groß ist, wie bei einem normalen Kappenisolator der Größe K3, und daß die Gefahr etwaiger Herstellungsfehler und damit verbundener Durchschläge natürlich mit der Größe der beanspruchten Fläche stark zunimmt.

Als eine ziemlich neuartige Verwendung von Hartporzellan ist in Abb. 94 noch ein großer Wasserwiderstand gezeigt. Solche Geräte finden für die verschiedensten Zwecke, u. a. auch für den Senderbau, Verwendung.

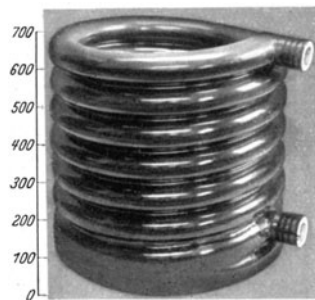


Abb. 94. Wasserwiderstand für Senderöhren.

Der Gebrauch des Porzellans, wie überhaupt keramischer Werkstoffe für Niederspannungs-, insbesondere Installationszwecke, ist bekanntlich schon außerordentlich alt und bedarf kaum besonderer Hervorhebung. Es sei nur ganz allgemein auf

die Vorteile hingewiesen, welche keramische Isolierstoffe als Träger spannungsführender Teile besitzen. Hier kommt die schon oben erwähnte Hitzebeständigkeit des Porzellans, ferner seine hohe Ziehfunken-sicherheit besonders vorteilhaft zur Geltung, indem sich auch bei noch so häufigen Schaltvorgängen auf der Porzellanoberfläche keine leitende Strombahn bildet.

Doch auch für andere Zwecke der Installationstechnik, wie Lampenfassungen, Leuchten, Rosetten, Feuchtraumteile aller Art, Leitungsklemmen, Rollen, Sicherungssockel, Patronen, Abzweigklemmen, Abdeckplatten, Einführungspfeifen usw. sind die günstigen Eigenschaften keramischer Werkstoffe, hohe Wärmebeständigkeit und Feuchtigkeitssicherheit, oft ausschlaggebend (vgl. auch S. 142).

### Hochspannungsprüfung.

Eine für Hochspannungsisolatoren besonders wichtige Maßnahme ist die Hochspannungsprüfung. Grundsätzlich muß bei ihrer Durchführung zwischen der Stückprüfung und der Typenprüfung unterschieden werden. Unter der Stückprüfung versteht man die mit jedem Isolator ohne Ausnahme nach ganz bestimmten, vom VDE festgelegten Richtlinien auszuführende elektrische oder mechanische Prüfung.

Die Typenprüfung ist dagegen vor allem eine Überschlagprüfung und zwar unter den für den betreffenden Verwendungszweck in Betracht kommenden ungünstigsten Bedingungen. Bei Freileitungsisolatoren wird also im allgemeinen außer der Trockenüberschlagspannung die Regenüberschlagspannung unter vorgeschriebenen Versuchsbedingungen untersucht. Für die oben erwähnten verschmutzungssicheren Isolatoren, die erfahrungsgemäß bei Nebel am meisten gefährdet sind, werden zur Zeit beim VDE noch Beratungen über die zweckmäßigste Durchführung einer Nebelprüfung geführt.

Neben der mit betriebsfrequentem Wechselstrom vorgenommenen Hochspannungsprüfung hat in letzter Zeit die sog. Stoßspannungsprüfung immer größere Bedeutung erlangt. Man versteht darunter die kurzzeitige Einwirkung einer bei der Entladung eines Kondensators über eine Zündfunkenstrecke auftretende Stoßwelle. Durch Veränderung der Konstanten des Stromkreises, also insbesondere der Kapazität des Stoßgenerators und des Entladewiderstandes, hat man es in der Hand, die Form der Stoßwelle innerhalb gewisser Grenzen zu beeinflussen. Nach den deutschen Leitsätzen<sup>1</sup> ist vor allem die Stoßwelle von  $0,5 \mu\text{s}$  Stirn- und  $50 \mu\text{s}$  Halbwertdauer vorgesehen, die fast genau mit der international festgelegten Stoßwelle  $1 | 50 \mu\text{s}$  übereinstimmt<sup>2</sup>.

Genau wie bei Betriebsfrequenz könnte man nun auch bei Spannungs-

<sup>1</sup> Vgl. VDE-Leitsätze 0450 § 7.    <sup>2</sup> JACOTTET, P.: ETZ Bd. 58 (1937) S. 41.

stoß Stückprüfung und Typenprüfung unterscheiden. Zwar bestehen schon seit 1926 VDE-Leitsätze für die Stückprüfung von Porzellanisolatoren mit Spannungsstößen<sup>1</sup>, also mit bestimmt vorgeschriebenen Werten für die Höhe der Spannung, die Zahl der Spannungsstöße, die Größe der Mindestkapazität des Stoßgenerators usw., doch ist im allgemeinen verhältnismäßig wenig Gebrauch von dieser Stückprüfung gemacht worden. Der Grund hierfür ist wohl der, daß außer den durch diese zusätzliche Prüfung bedingten Mehrkosten (denn jeder mit Stoß geprüfte Isolator muß unbedingt nachträglich auch noch mit Wechselspannung geprüft werden) der praktische Wert dieser Stoßstückprüfung nicht genügend sichergestellt ist. Weiter besteht auch noch eine gewisse Furcht, daß durch zu scharfe Stoßprüfung unter Umständen eine Vorbeschädigung des Isolators eintreten könnte. Die Stoßprüfung wird daher auch bei Porzellanisolatoren meist nur als Typenprüfung durchgeführt. Dabei wird zunächst immer die Mindest-Stoßüberschlagspannung bestimmt, d. h. derjenige Spannungswert, der bei der betreffenden Stoßwelle gerade noch zum Überschlag am Isolator führt. Er liegt je nach der Polarität der Stoßwelle und der Form des Isolators mindestens 10 ... 40% über dem Scheitelwert der betriebsfrequenten Dauerüberschlagspannung.

Jedenfalls spielen die Höhe der Mindest-Stoßüberschlagspannung und die Stoßkennlinie eines Isolators (Höhe der Stoßüberschlagspannung in Abhängigkeit von der Überschlagszeit) für sein Verhalten bei rasch verlaufenden Überspannungen im Betrieb eine wichtige Rolle. Die Bestimmung dieser Größen ist daher für jede Isolatorgattung von Bedeutung. In richtiger Würdigung dieser Tatsache haben daher auch die meisten deutschen Porzellanfabriken selbst entsprechende Stoßanlagen errichtet. In einer deutschen Porzellanfabrik ist ja auch die wohl in allen derartigen, auch ausländischen, Stoßanlagen für die Erzeugung sehr hoher Stoßspannungen benutzte Schaltung, die Marx'sche Vervielfachungsschaltung, entwickelt worden.

Die verschiedene Art des Funkenüberschlages bei Stoßspannungen möge Abb. 95 a, b veranschaulichen. Diese gibt den Überschlag einer mehrgliedrigen Kette von Kappenisolatoren wieder und zwar links bei negativer Mindeststoßüberschlagspannung von 525 kV und rechts bei einer Stoßspannung von 650 kV, also einer um etwa 25% erhöhten Spannung. Dabei ist auffällig, daß, wie man sich bei allen derartigen Aufnahmen überzeugen kann, die Neigung zum kaskadenförmigen Überschlag mit der Höhe der die Mindeststoßüberschlagspannung übersteigenden Stoßspannung zunimmt<sup>2</sup>. Weitere eingehende Versuche werden vielleicht in

<sup>1</sup> Vgl. VDE-Leitsätze 0447.

<sup>2</sup> OBENAU, F.: Hescho-Mitt. Heft 74/75 (1936) S. 71.

dieser Beziehung noch Aufklärung bringen. Im Vergleich zu dem schon sehr gründlich erforschten Überschlagverhalten von Porzellanisolatoren bei Betriebsfrequenz befinden wir uns ja leider bei Spannungsstoß trotz regster, in vielen Versuchsfeldern geleisteter Forschungsarbeit noch im Anfang. Dies trifft z. B. auch für die betrieblich außerordentlich wichtige Frage zu, ob und inwieweit bei Spannungsstößen von großer Höhe eine Vorbeschädigung der Porzellanisolatoren eintritt, oder mit

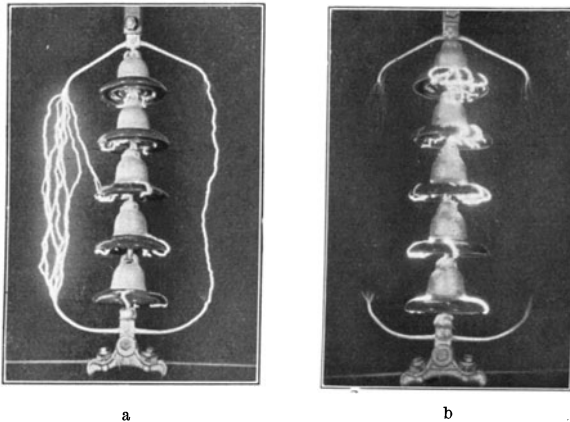


Abb. 95 a, b. Stoßüberschläge bei verschiedener Spannung.  
(Links 525 kV, rechts 650 kV; Stoßwelle 0,5/50  $\mu$ s.)

welcher größten Stirnsteilheit des Spannungsstoßes ein Porzellanisolator beansprucht werden darf, ohne durchzuschlagen. Es sind dies Fragen, die u. a. zur Zeit von einem besonderen internationalen Ausschuss für Stoßspannungen behandelt werden und die als Unterlage für spätere internationale Prüfbestimmungen für Porzellanisolatoren bei Spannungsstoß dienen sollen, wie sie 1935 für betriebsfrequente Prüfungen von der IEC schon aufgestellt worden sind.

## II. Keramische Sondermassen.

Zu der Gruppe I „Hartporzellan“ wird üblicherweise noch eine unter dem Namen Melalith bekannte Masse hinzugerechnet, die eine geringe Beimischung von etwa 4–5% Speckstein enthält, aber in ihren Haupteigenschaften nur wenig von denjenigen des Porzellans abweicht. Um so mehr ist dies bei den keramischen Massen der Gruppen II–IV der Fall, die sich schon in der Zusammensetzung grundsätzlich von der Gruppe I unterscheiden. Während diese vornehmlich durch Aluminiumsilikate (also Tonsubstanz) als Hauptbestandteil gekennzeichnet sind, umfaßt die Gruppe II solche Massen, die fast ausschließlich aus Magnesiumsilikaten (also Speckstein oder Talkum) bestehen.



Als Haupteigenschaften kommen für diese Massen ihre leichte Trockenpreßbarkeit und die dadurch bedingte geringe Schwindung, die größere Maßhaltigkeit der gebrannten Stücke, ihre höhere mechanische Festigkeit und endlich der hohe Isolationswiderstand und damit zusammenhängend die geringen dielektrischen Verluste in Betracht.

Die erste in der Übersichtstafel am Schlusse dieses Buches mit Normalmasse bezeichnete Untergruppe II<sup>1</sup> ist unter dem Namen Steatit schon seit vielen Jahren bekannt, während die zweite Untergruppe II<sup>2</sup> dieser specksteinhaltigen Massen in veredelter Form und mit wesentlich verbesserten Eigenschaften als Calit, Frequenta sowie weiter als Calan und Frequenta D erst in den letzten Jahren Bedeutung erlangt hat.

### **Herstellung keramischer Sondermassen.**

Die Herstellung der keramischen Massen nach Gruppe II, wie übrigens auch derjenigen nach III und IV, erfolgt grundsätzlich nach den gleichen Verfahren wie bei Hartporzellan. Nachdem die Rohstoffe zerkleinert, gut gemahlen, im Mischbottich verrührt und der so gewonnene Schlicker in Filterpressen von dem überschüssigen Wasser befreit ist, unterscheidet man also auch hier die folgenden Herstellungsverfahren: Drehen, Strangpressen, Gießen und Naßpressen. Als weiteres und zur Erreichung größerer Maßgenauigkeit sowie verbesserter Eigenschaften besonders wichtiges Verfahren kommt hier noch das Trockenpressen hinzu. Ermöglicht wird die Trockenpressung durch die eigenartige, fettige Beschaffenheit des Specksteins und Talkes, während tonsubstanzhaltige Massen besser naßgepreßt werden. Von dem bei Hartporzellan üblichen Naßpreßverfahren unterscheidet sich das Trockenpreßverfahren hauptsächlich dadurch, daß die pulverisierte Masse nicht, wie dort, mit reichlich Öl und Wasser angemacht und in die aus Unter- und Oberstempel bestehende Stahlmatrize mit viel Überschuß eingebracht wird, sondern die pulverisierte Masse wird nahezu ganz ohne Feuchtigkeitszusatz in genau abgemessener Menge der Matrize ohne Überschuß zugeführt und unter hohem Druck von etwa 150 at eingepreßt. Besonders wichtig bei der Trockenpressung ist, daß durch zweckentsprechende Unterteilung der Matrize für gleichmäßige Preßhärte des Formlings gesorgt wird, um ein nachträgliches Verziehen und eine ungleichmäßige Schwindung zu vermeiden. Überhaupt spielt gerade bei der Herstellung trockengepreßter, häufig außerordentlich schwieriger Stücke die richtige, d. h. stoffgerechte, dem Herstellungsgang angepaßte Formgebung des Stückes eine ausschlaggebende Rolle. Es sollten daher gerade hier durch verständnisvolles Zusammenarbeiten von Besteller und Lieferwerk unnötige Herstellungsschwierigkeiten und dadurch bedingte Mehrkosten vermieden werden! Da der Preßdruck beim Trockenpressen im allgemeinen viel größer

als beim Naßpreßverfahren ist, so sind trockengepreßte Stücke auch elektrisch hochwertiger. Sie erreichen fast die Durchschlagfestigkeit gedrehter und gegossener Stücke. Allerdings setzt die teure und schwierige Anfertigung der Stahlmatrizen die Herstellung genügend großer Stückzahlen (mindestens 100 . . . 1000) voraus. Auf der anderen Seite lohnt sich bei sehr großen Mengen auch die Anfertigung mittels voll-automatischer Pressen.

Neben dem Preßverfahren ist das Gießverfahren für keramische Sondermassen von Bedeutung, wobei je nach der Form des Werkstückes nach dem Hohl- oder Kernguß-Verfahren gearbeitet wird. Für die Herstellung dünnwandiger Rohre endlich hat das Strangpressen oder Spritzen der aus einem Stahlzylinder mittels hydraulisch angetriebenen Kolbens durch ein Mundstück gedrückten Masse größere Bedeutung erlangt. Selbstverständlich wird daneben das altbewährte Drehverfahren auch noch nach Möglichkeit angewandt.

Damit der nach einem dieser Verfahren hergestellte Isolierkörper sich in dem bei etwa 1300 . . . 1400° erfolgenden Glattbrand nicht verzieht, werden, wie bei Porzellan, häufig Abstützkörper, sog. Bomse, verwendet, die zwecks Innehaltung gleichgroßer Schwindung aus derselben hochwertigen Masse wie der betreffende Körper selbst bestehen müssen.

Um höchste Maßgenauigkeit zu erreichen, ist während der letzten Jahre noch ein besonderes Herstellungsverfahren durchgebildet worden, das außerdem auch die Herstellung geringerer Stückzahlen ohne die Anfertigung teurerer Stahlmatrizen ermöglicht. Es ist dies die Zwischenbearbeitung der halbfertigen Stücke in verglühtem Zustand. Sie beruht darauf, daß man die roh vorbearbeiteten Stücke zunächst einem Vorbrande von etwa 800 . . . 900° unterwirft. Hierdurch erhalten die Stücke eine solche Festigkeit, daß sie sich, ähnlich wie Metall, mit Werkzeugen aus Sonderstahl bearbeiten, also z. B. bohren, drehen, fräsen und mit Gewinde versehen lassen. Dann aber ist es gar nicht nötig, dem noch nicht verglühten Stück überhaupt schon von vornherein die endgültige Form zu geben, sondern es genügt unter Umständen schon eine in den äußeren Umrissen nahekommende Gestalt, die nun nach dem Verglühen nach den Regeln der Feinmechanik weiter bearbeitet wird. Da in dem anschließenden Glattbrande nur noch eine Schwindung von etwa 10—14% eintritt, die ziemlich genau vorausberechenbar ist, so ist eine weit größere Maßgenauigkeit gewährleistet. Wichtig ist auch, daß nach diesem Verfahren schon in wenigen Tagen Handmuster vorgelegt werden können, deren rasche Beschaffung für konstruktive Fragen beim Bau neuer Geräte von Bedeutung sein kann.

Noch eines weiteren, bisweilen vorteilhaften Sonderherstellungsverfahrens sei an dieser Stelle gedacht: In vielen Fällen wird man, teils aus brenntechnischen Gründen, teils mit Rücksicht auf größere Genauigkeit

schwierigere keramische Stücke aus mehreren Teilen herstellen müssen. Diese können dann nach dem Glattbrande durch Verwendung einer entsprechenden Schmelzglasur miteinander verbunden werden, nachdem sie erforderlichenfalls vorher zueinander passend geschliffen worden sind. So können z. B. auf einer größeren Grundplatte Warzen aufglasiert werden, deren Lochabstände durch besondere Lehren während des Brandes genau eingehalten werden. Dieses Zusammenglasierverfahren, das gegenüber anderen Vereinigungsverfahren, wie Kitten oder Kleben, den Vorzug elektrischer Verlustfreiheit bietet, erfolgt bei 800 . . . 900° im Schmelzofen oder in einem besonderen Muffelofen mittels dünner Schmelzglasur. Es ist also durchaus von dem auch bei Porzellan üblichen „Zusammengarnieren“ der noch rohen, ungebrannten Stücke mittels zähflüssigen Schlickers zu unterscheiden.

Die nach den bisher beschriebenen Herstellungsverfahren erreichbare Maßgenauigkeit beträgt im allgemeinen, also ohne die oben erwähnte Zwischen- oder Nachbearbeitung:

- bei gedrehten oder gegossenen Stücken etwa . . .  $\pm 3 \dots 5\%$ ,
- bei naßgepreßten oder stranggepreßten Stücken etwa  $\pm 2 \dots 3\%$ ,
- und bei trockengepreßten Stücken etwa . . . . .  $\pm 1 \dots 2\%$ .

Genügt diese Genauigkeit nicht, so kann sie durch Nachbearbeitung der fertiggebrannten Stücke erheblich gesteigert werden. Bei der großen Härte fertiggebrannter keramischer Stücke kommt für die Nachbearbeitung allerdings fast nur Schleifen in Betracht. Mit einfachen Plan- oder Zylinderschleifen, wobei vor allem die sog. „spitzenlose Schleifmaschine“ mit großem Vorteil auch für die Massenfertigung verwendet wird, ist bei Stücken geeigneter Formgebung eine Genauigkeit von  $\pm 1/100$  mm und mehr erreichbar.

Für den Zusammenbau der fertiggebrannten, unter Umständen noch nachgeschliffenen keramischen Isolierstücke mit den zugehörigen Geräteteilen ist eine feste, aber verlustfreie Verbindung von großer Bedeutung. Bei der großen mechanischen Festigkeit der Steatit-Massen können die Körper vielfach durch Verschrauben oder auch Aufschrumpfen mit den Metallteilen verbunden werden. In diesem Zusammenhange sei ein von der Kerb-Konus G. m. b. H. zusammen mit der Hermsdorf-Schomburg-Isolatoren-Gesellschaft entwickeltes Verfahren erwähnt, bei dem die einzustauchenden Bolzen oder Metallstifte während des Stauchvorganges elektrisch erweicht werden, indem sie auf kurze Zeit in den Stromkreis eines Transformators eingeschaltet werden. Sie lassen sich dann ohne jede stoßartige Beanspruchung unter Druck gegen die entsprechend ausgebildeten Wandungen des keramischen Körpers pressen, wobei das Zusammenschrumpfen beim Abkühlen einen sehr festen Sitz der Teile gewährleistet (Abb. 96).

Als ganz besonders wichtig für die verlustfreie Verbindung von kerami-

schen Isolierkörpern mit festhaftenden Metallschichten haben sich die chemische Versilberung und die Kathodenzerstäubung, vor allem aber als umfassendstes Verfahren das Einbrennen des Metallbelages erwiesen. Nach dem Einbrennverfahren wird ein Edelmetallbelag,

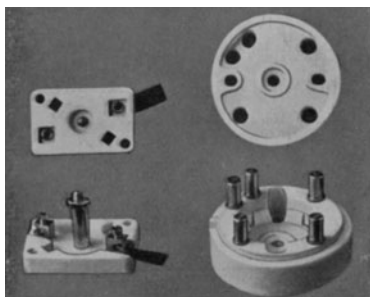


Abb. 96. Keramische Isolierteile mit elektrothermisch eingestauchten Metallarmaturen.

meist Silber, in flüssiger Form auf den keramischen Körper aufgestrichen oder unter Verwendung von Abdeckschablonen aufgespritzt, bei etwa  $700^{\circ}$  eingebrannt und dann, wenn nötig, noch galvanisch oder nach dem Schoopschen Spritzverfahren verstärkt. So ist es möglich, z. B. ganze Metallklötzchen in die Bohrungen keramischer Stücke einzulöten und sie dann durch Fräsen, Bohren oder Gewindeschneiden weiter zu bearbeiten.

### Anwendung keramischer Sondermassen.

Die wichtigsten Anwendungsgebiete der unter den Gruppen II—IV zusammengefaßten Sondermassen sind durch die elektrischen und mechanischen Eigenschaften der betreffenden Massen bedingt, die aus der Eigenschafts- und Übersichtstafel keramischer Werkstoffe am Schlusse dieses Buches ersichtlich sind.

**A. Massen der Gruppe II.** Für die Massen der Gruppe II sind in der zweiten Querspalte unter „Richtunggebende Eigenschaften“ aufgeführt: „Geringer Verlustwinkel, hohe Maßhaltigkeit, große mechanische Festigkeit“. Tatsächlich bestimmen diese Eigenschaften auch die hauptsächlichste Anwendung. Zunächst die große mechanische Festigkeit: Daß die Schlagbiegefestigkeit nach Querspalte 8 mit  $4 \dots 6 \text{ cmkg/cm}^2$  für Massen der Gruppe II etwa 2...3 mal so groß ist wie bei Porzellan nach Gruppe I, ist für viele Zwecke der Installationstechnik von Bedeutung. Hinzu tritt die schon behandelte große Maßgenauigkeit besonders für trockengepreßte Stücke. Daher werden specksteinhaltige Massen, sowohl nach Gruppe II<sup>1</sup> wie II<sup>2</sup> in großem Umfange für alle möglichen Zwecke der Elektrotechnik als Isolierstoffe verwandt, wo ihre besonderen Eigenschaften in der einen oder anderen Richtung, z. B. die gute Isolierfähigkeit bei hohen Temperaturen oder die Schalfunkensicherheit, Vorteile bieten (vgl. Abb. 97).

An dieser Stelle seien noch die aus Naturspeckstein gefertigten Erzeugnisse kurz erwähnt, obwohl es sich dabei nicht um ein eigentliches keramisches Arbeitsverfahren handelt. Naturspeckstein läßt sich infolge seiner Weichheit in ungebranntem Zustand durch Sägen, Drehen, Fräsen und Bohren vorzüglich bearbeiten und erhält durch den nach-

folgenden Brand eine beträchtliche Erhärtung und ein nahezu dichtes Gefüge. Da die Schwindung hierbei nur etwa 2% beträgt, so ist mit Naturspecksteinerzeugnissen, deren Größe allerdings auf höchstens 50 mm in einer Raumausdehnung beschränkt ist, eine verhältnismäßig hohe Maßgenauigkeit zu erzielen.

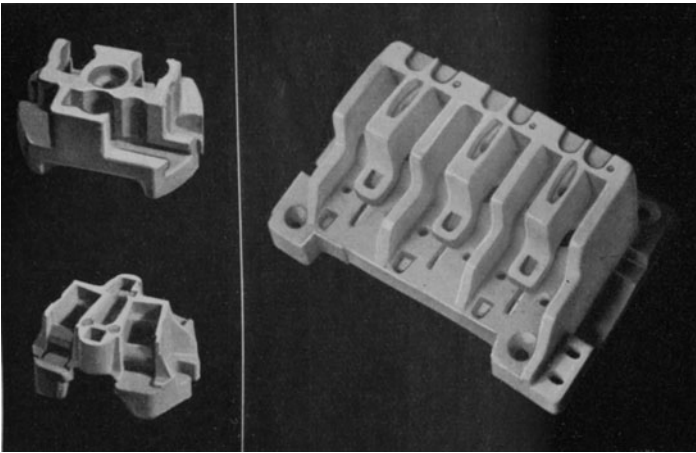


Abb. 97. Gepreßte Installationsteile aus Werkstoffen der Gruppe II.

Im übrigen sei wegen der vielfachen und wichtigen Anwendungsmöglichkeiten von specksteinhaltigen Massen in der Installationstechnik auf andere Stellen<sup>1</sup> verwiesen. Dagegen sei hier auf dasjenige Anwendungsgebiet der Sondermassen nach Gruppe II<sup>2</sup> noch etwas näher eingegangen, für das geringer Verlustwinkel und hoher Isolationswiderstand sie in den letzten Jahren geradezu unentbehrlich gemacht haben, nämlich die Hochfrequenztechnik.

Wie außerordentlich sich keramische Sondermassen durch ihren gro-

<sup>1</sup> Vgl. BURMEISTER: Isolierstoffe in der Niederspannungstechnik, S. 199 dieses Buches.

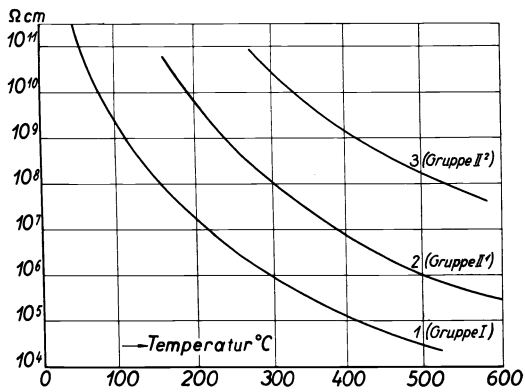
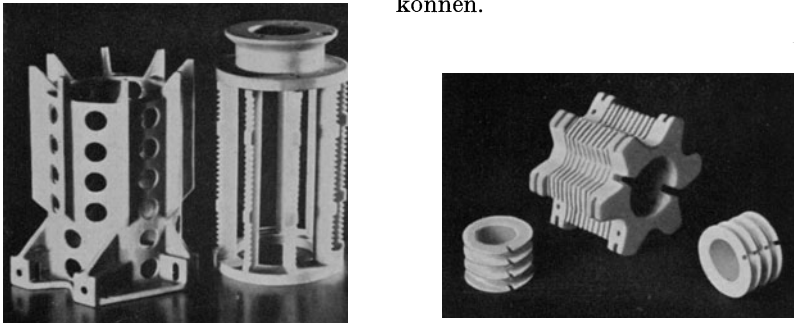


Abb. 98. Elektrischer Widerstand keramischer Werkstoffe bei höheren Temperaturen.

Ben Isolationswiderstand, insbesondere bei hohen Temperaturen, von gewöhnlichem Porzellan unterscheiden, veranschaulicht Abb. 98. Unter Kurve 1 ist dabei normales Porzellan, unter Kurve 2 Massen der Gruppe II<sup>1</sup>, also normales Steatit, und unter Kurve 3 Massen der Gruppe II<sup>2</sup>, also Calit und Frequenta verstanden. Ähnlich verhält es sich mit den Verlustfaktoren, die im allgemeinen etwas frequenzabhängig sind (vgl. Zahlentafel auf S. 149).

Die neuen Sondermassen besitzen im Vergleich zu Porzellan bei Hochfrequenz einen außerordentlich kleinen Verlust, nämlich nur den 20. bis 30. Teil. Die hierdurch erschlossenen Anwendungsgebiete für die Hochfrequenztechnik sind so zahlreich, daß nur einige wenige besonders nahe-  
liegende Beispiele angeführt werden können.



a b  
Abb. 99a u. b. Hochfrequenz-Spulenkörper aus Werkstoffen der Gruppe II<sup>2</sup>.

Zunächst aus dem Empfängerbau (Abb. 99a u. b): Bekanntlich bestehen die Abstimmkreise eines Rundfunkempfängers aus Kondensatoren und Spulen. In beiden Abstimmitteln werden die Dämpfungswerte außer durch Ohmschen Widerstand hauptsächlich durch dielektrische Verluste im Isolierstoff bedingt. Bei den Drehkondensatoren können diese durch die Verwendung eines Isolierstoffes mit kleinem Verlustwinkel für die Statorisolierung wie auch für die Rotorachse wesentlich herabgesetzt worden.

Bei den Abstimmspulen und Hochfrequenzdrosseln liegt der Hauptvorteil keramischer Stoffe besonders in der Unveränderlichkeit der elektrischen Eigenschaften. Infolge der günstigen mechanischen Eigenschaften ist selbst bei sehr dünnwandigen keramischen Trägern keinerlei Verspannen durch zu festes Aufwickeln des Drahtes zu befürchten. Die Unempfindlichkeit gegen Temperatur- und Feuchtigkeitsschwankungen verhindert ferner ein Verlagern der Wicklung, was besonders bei Kurzwellenspulen wichtig ist.

Außer für die Abstimmittel können keramische Isolierstoffe beim

Empfängerbau mit Vorteil auch für alle sonstigen Bauteile verwendet werden, die im Hochfrequenzfelde oder im Streufelde liegen. Daher werden zur Verringerung der Dämpfungsverluste auch Röhrensockel, Fassungen, Wellenschalter, Halterungen, Durchführungen, Grundplatten usw. gern aus verlustarmen keramischen Isolierstoffen hergestellt.

Einen wichtigen Fortschritt bedeutete die Verwendung dieser keramischen Massen als Dielektrikum von Kondensatoren, die sich durch geringe Verluste, Formstarrheit und Konstanz der Kapazitätswerte auszeichnen und keiner zeitlichen Veränderung unterworfen sind.

Während bei den Empfangsgeräten die hochwertigen keramischen Isolierstoffe besonders zu einer Erhöhung der Empfindlichkeit und Trennschärfe beitragen, dienen sie im Senderbau vor allem zur Vermeidung schädlicher, durch die Verluste bedingter Erwärmung. Dies ist besonders für Kurzwellen und Ultra-Kurzwellensender von Bedeutung. Weiter kommen hier zugunsten der keramischen Stoffe neben ihrer Unveränderlichkeit noch ihre große elektrische Durchschlagfestigkeit und ihre Unempfindlichkeit gegen Sprühen, Glimmen, wie auch gegen Witterungs- und Feuchtigkeitseinflüsse in Betracht, da bei Sendern auch die Spannungsbeanspruchung der Isolierkörper nicht mehr zu vernachlässigen ist. Infolgedessen werden keramische Isolierstoffe der Gruppe II und häufig auch der Gruppe Ia mit Vorteil u. a. als Abspannisolatoren, Trag- und Stützkörper aller Art, Abstandhalter und für viele ähnliche Zwecke verwendet. Dabei handelt es sich häufig um recht ansehnliche Abmessungen, wie dies Abb. 100 an einer Hochfrequenz-Durchführung von 1250 mm Höhe aus Calit oder Frequenta veranschaulicht. Als Mastfußisolatoren

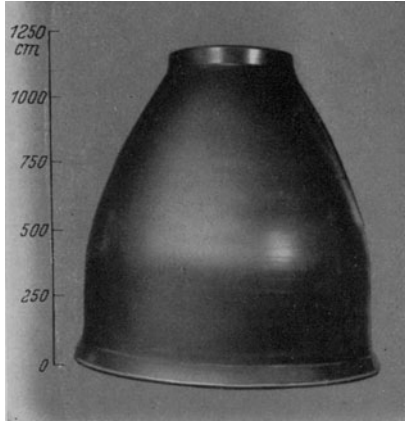


Abb. 100. Hochfrequenz-Durchführung.

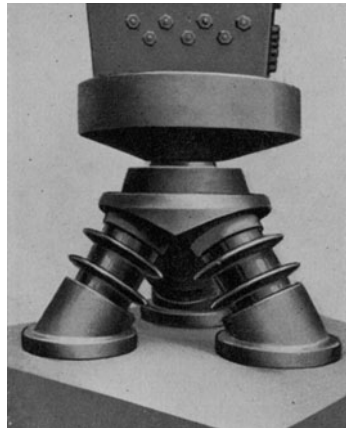


Abb. 101. Mastfußisolatoren.

werden oft massive (vgl. Abb. 101) oder ringförmige Druckkörper verwendet, die für Betriebslasten von mehr als 500 t hergestellt werden. Für Pardunen-Abspannungen kommen sattelförmige oder zylindrische Isolierkörper in Betracht, wobei sattelförmige Körper Prüfdrücken bis 150 t, massive zylindrische Körper Prüfdrücken bis 500 t und mehr standhalten müssen.

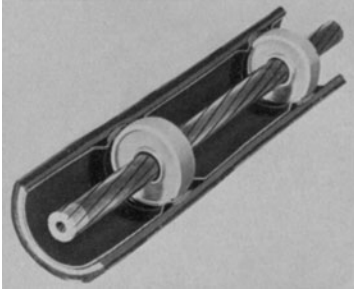


Abb. 102. Hochfrequenzkabel mit verlustarmen keramischen Ringen.

In ganz anderer Weise finden verlustarme keramische Isolierstoffe auch als Abstandhalter für luftisolierte Hochfrequenzkabel vorteilhaft Verwendung (Abb. 102).

Von keramischen Kondensatoren kommen in der Hochfrequenztechnik folgende Ausführungsformen in Betracht:

a) für kleine Leistungen (Abb. 103):

Hütchen-, Scheiben-, Halmkondensatoren, einfache Platten, einfache und Doppelrohre<sup>1</sup>, ferner Regelkondensatoren (Trimmer);

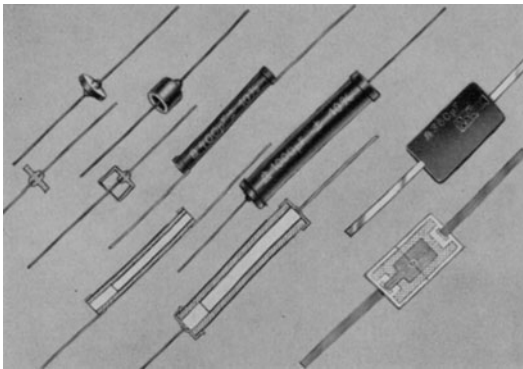


Abb. 103. Bauarten von festen Kleinkondensatoren.

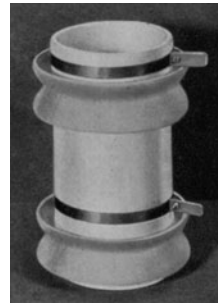


Abb. 104. Zylinderkondensator.

b) für größere Leistungen:

Mehrfachrohre, Mehrlochrohre, ferner Platten, Töpfe und Zylinder mit Wulsten (Abb. 104).

Besonders für höhere Spannungen hat sich der verdickte bzw. wulstförmige Schutzrand zur Vermeidung von Glimmentladungen längs der Ränder des Metallbelages als ganz unentbehrlich erwiesen (Abb. 105).

<sup>1</sup> Selbst die kleinsten Röhren-Kondensatoren von 0,3 mm Wandstärke werden mit 1500 V Wechselspannung geprüft.



Für größere Kapazitätswerte oder höhere Spannungen werden Platten-Kondensatoren zu Kondensatorblöcken nach Abb. 106 vereinigt,

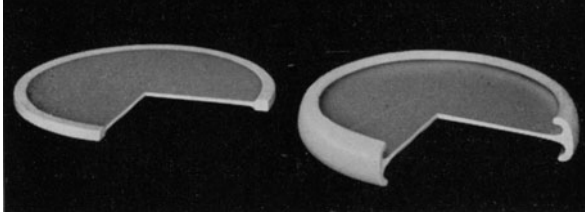


Abb. 105. Kondensatorplatten mit aufgebranntem Metallbelag.  
Rand: links verstärkt, rechts wulstförmig.

wobei die einzelnen Platten entweder parallel oder in Reihe geschaltet werden.

Als drittes Hauptanwendungsgebiet keramischer Massen der

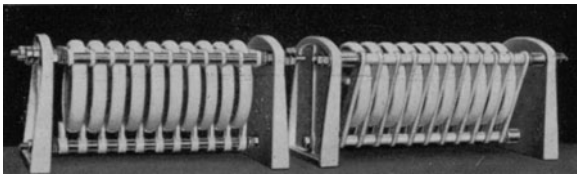


Abb. 106. Hochleistungs-Block-Kondensatoren. Links in Parallel-,  
rechts in Reihenschaltung.

Gruppe II<sup>2</sup> sei noch ihr Einbau in Hochfrequenzmeßgeräte kurz gestreift. Hier ist es den keramischen Sondermassen gelungen, in vielen Fällen mit Vorteil an die Stelle von Quarzglas oder selbst Quarz zu treten, da die keramischen Massen der Gruppe II<sup>2</sup> bei wenig höherem Verlustwinkel als Quarz viel größere Möglichkeiten in der konstruktiven Durchbildung bieten. Als Beispiel eines derart vollkommen starren und zeitlich völlig unveränderlichen Luftkondensators ist in Abb. 107 ein Meßkondensator wiedergegeben, der bei 3000 kHz oder 100 m Wellenlänge nur einen Verlustfaktor von etwa  $0,5 \cdot 10^{-4}$  besitzt.

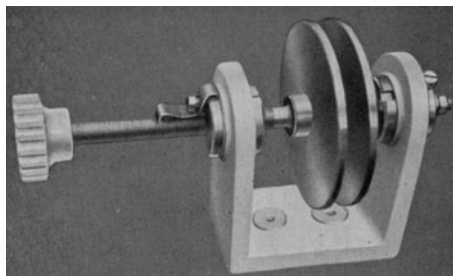


Abb. 107. Veränderbarer Meßkondensator.

Als letztes Beispiel für die Hochfrequenztechnik seien zylindrische Präzisionsspulen aus Werkstoffen der Gruppe II<sup>2</sup> mit unmittelbar auf-

gebrannten Spulenwindungen nach Abb. 108 erwähnt. Bei diesen Präzisionsspulen werden die Windungen überhaupt nicht aus aufgewickeltem Draht hergestellt, sondern aus Edelmetall elektrisch eingebrannt. Der Belag haftet dann so fest, daß für das Verhalten bei Temperaturänderungen nicht mehr sein eigener Ausdehnungskoeffizient, sondern derjenige des keramischen Trägers maßgebend ist. Dabei ist ein nachträgliches Lösen des Metallbelages selbst bei stärksten Temperaturschwankungen ausgeschlossen, da die Elastizität des dünnen Metallbelages jeden mechanischen Spannungsunterschied selbsttätig ausgleicht. Außer als Zylinder- spulen können derartige Normalspulen auch als Flachspulen oder Ringspulen ausgeführt werden.

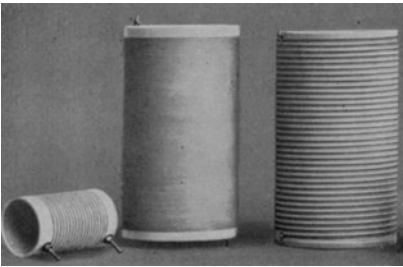


Abb. 108. Normalspulen aus Calit mit unmittelbar aufgebrannten Spulenwindungen.

**B. Massen der Gruppe III.** Die Massen der Gruppe III, d. h. rutilhaltige Sondermassen, wie Condensa und Kerafar, sind, wie schon erwähnt, durch ihre außerordentlich hohe Dielektrizitätskonstante gekennzeichnet. In diesem Zusammenhang mögen noch einige weitere, zwar außerhalb der Gruppe III stehende, aber mit ihr verwandte Sondermassen mit aufgeführt werden,

die als Magnesiumtitanate aufzufassen sind und die Namen Tempa S und Diakond führen.

Alle zur Gruppe III gehörigen Stoffe enthalten Titandioxyd. Dieses bzw. das als Kristallform von Titandioxyd bekannte Mineral Rutil zeichnet sich durch seine außerordentlich hohe Dielektrizitätskonstante von rd. 110, sowie durch seinen negativen Temperaturkoeffizienten der Kapazität aus, d. h. seine Dielektrizitätskonstante nimmt entgegen dem Verhalten aller übrigen festen Isolierstoffe mit steigender Temperatur ab. Durch Mischung von Rutil mit anderen Stoffen kann man Massen beliebig hoher Dielektrizitätskonstante von beispielsweise 40, 65 oder 80 und dementsprechend auch verschieden stark negativem Temperaturkoeffizienten von beispielsweise  $-360$  bis  $-700 \cdot 10^{-6}$  herstellen, wie dies bei den Massen Condensa C, F und N sowie Kerafar S, T und U der Fall ist.

Ein gewisser Nachteil haftete den zunächst entwickelten Massen mit hoher Dielektrizitätskonstante insofern noch an, als bei ihnen der Verlustfaktor noch stark frequenzabhängig war und bei mittleren Frequenzen von z. B. 800 Hz schon demjenigen gewöhnlicher keramischer Massen entsprach. Es bedeutete daher einen wesentlichen weiteren Fortschritt, als es neuerdings gelang, den Verlustwinkel praktisch frequenzunabhängig und zudem wenig temperaturabhängig zu machen, dabei

aber doch eine hohe Dielektrizitätskonstante (von beispielsweise 45 bzw. 65 bei den Massen Kerafar T und U, bzw. von 65 . . . 70 bei der Masse Condensa F), beizubehalten. Einer der zu diesem Erfolg führenden Wege ist die Beimischung von Zirkondioxyd.

Einen außerordentlich geringen Temperaturkoeffizienten von etwa  $-30$  bzw.  $-100 \cdot 10^{-6}$  haben die Massen Tempa N bzw. Kerafar V. Doch liegt bei diesen Massen der Verlustfaktor mit  $10 \dots 15 \cdot 10^{-4}$  etwas höher als bei den Massen mit höchsten Dielektrizitätskonstanten.

In noch weiterer Entwicklung dieser Sondermassen ist es schließlich möglich geworden, in den Massen Tempa S und Diakond zwei Massen herzustellen, die bei mittlerer Dielektrizitätskonstante von etwa  $14 \dots 16$  einen außerordentlich geringen Verlustfaktor von weniger als  $1 \cdot 10^{-4}$  besitzen, wobei die Frequenzunabhängigkeit dieses niedrigen Verlustfaktors nahezu gewahrt ist. Der wesentliche, für die Eigenschaften dieser Werkstoffe maßgebende Bestandteil ist die Verbindung Magnesiumtitanat.

Die folgende Zahlentafel 9 bringt eine Zusammenstellung wichtiger anorganischer, sowie insbesondere der eben behandelten keramischen Isolierstoffe der Elektrotechnik, wobei die Massen mit erhöhter Dielektrizitätskonstante in den Querspalten 1 und 7—12 aufgeführt sind.

Zahlentafel 9.

Wellenlänge in m in kHz	tg $\delta$ bei 20°			Dielektrizitätskonstante	Temp. Koeff. d. DK in $10^{-6}$ für 1° C, etwa
	1000 300	300 1000	30 10 000		
1. Tempa S, Diacond .	$\times 10^{-4}$ <1	$\times 10^{-4}$ <1	$\times 10^{-4}$ <1	14...16	+40
2. Quarz . . . . .	1,0	1,0	1,0	4,7	
3. Glimmer . . . . .	1,7	1,7	1,7	7	+80
4. Quarzglas . . . . .	1,8	1,8	1,7	4,2	
5. Calit, Frequenta . .	4...5	4...5	3...4	6...6,5	+140
6. Quarzgut . . . . .	5,0	5,2	5,8	3,9	
7. Condensa C . . . . .	7,2	5,6	3,2	80	-720
8. Kerafar S . . . . .	15	10...12	5...7	70	-600
9. Kerafar T und U . .	3	3	3	45 u. 65	-500 u. 600
10. Condensa F . . . . .	3...4	3...4	3...4	65 u. 70	-720
11. Condensa N . . . . .	8,5	6,9	4,6	40	-360
12. Tempa N, Kerafar V	15	13	9...10	12,5	-30 u. -100
13. Micalex . . . . .	19	18	18	8	
14. Porzellan . . . . .	70	55	63	5,4	+550

Durch die rutilhaltigen Sondermassen wurde eine große Reihe neuer Anwendungsgebiete erschlossen, wobei auch in fertigungstechnischer Hinsicht, also für die Formgebung, nicht allzu große Einschränkungen

bestehen. Die Massen der Gruppe III werden überall dort in Frage kommen, wo es auf hohe Dielektrizitätskonstante zur Verkleinerung der äußeren Abmessungen von Kondensatoren ankommt, die magnesium-titanathaltige Massen dort, wo eine sehr vollkommene, d. h. auch von der Temperatur unabhängige Konstanz des Kapazitätswertes Bedingung ist.

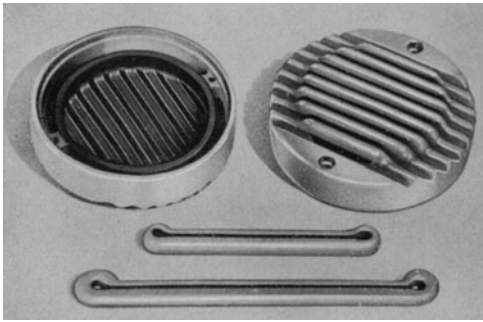


Abb. 109. Isolierteile aus Frequenta für medizinische Hochfrequenzbehandlung.

mit Leichtigkeit also in einem Gerät frei tragend angeordnet werden können. Dabei kann die Kapazitätstoleranz all dieser keramischen Kondensatoren, insbesondere auch der Röhren-Kondensatoren erstaunlich gering (bis 0,5% Toleranz, mindestens jedoch auf  $\pm 0,2$  pF genau)

gehalten werden, indem die Kapazität jedes einzelnen Kondensators vor Versand gemessen und durch Abschleifen des aufgebrannten Metallbelages abgeglichen wird.



Abb. 110. Ardostanplatte mit eingeschmolzenem Loch.

gehalten werden, indem die Kapazität jedes einzelnen Kondensators vor Versand gemessen und durch Abschleifen des aufgebrannten Metallbelages abgeglichen wird.

Das Hauptanwendungsgebiet der Massen Diakond und Tempa S mit geringsten Verlusten sind vorläufig Röhren- und Flachkondensatoren, die bei Wandstärken von 0,3...1 mm als Normkondensatoren mit höchster Verlustfreiheit und Temperaturunabhängigkeit des Kapazitätswertes Verwendung finden können.

Auch für medizinische Hochfrequenzbehandlung sind Isolierteile aus verlustarmem keramischem Werkstoff mit Erfolg verwendet worden (vgl. Abb. 109).

**C. Massen der Gruppe IV.** Die letzten, hier zu behandelnden keramischen Massen sind diejenigen der Gruppe IV, die als tonsubstanz-speck-

steinhaltige Massen durch ihren kleinen Wärmeausdehnungskoeffizienten gekennzeichnet sind und deshalb außerordentlich widerstandsfähig gegen Temperaturschwankungen sowie gegen unmittelbare Funken- und Lichtbogeneinwirkungen sind. Die Sicherheit in dieser Beziehung geht soweit, daß man (vgl. Abb. 110) mit einem elektrischen Lichtbogen ein Loch in eine Platte brennen kann, ohne daß sie springt. Dabei ist dieser Werkstoff, der unter den Namen Sipa und Ardostan bekannt ist, vollkommen dicht und auch elektrisch so hochwertig, daß er mit bestem Erfolg auch für Hochspannungs-Freileitungsisolatoren verwendet werden kann. Auch für bestimmte Schalterteile und in Funkenlöschkammern finden diese hochwärmefesten, dichten keramischen Massen vorteilhaft Verwendung.

Ein weiteres Anwendungsgebiet sind Elektrodampfkessel, wo die keramischen Teile, z. B. als Durchführungsisolatoren sehr schroffen Temperatursprüngen ausgesetzt sind oder (Abb. 111) als Verdrängungskörper zur Leistungsregelung dienen und dabei auch chemisch widerstandsfähig gegen die Beanspruchung durch das überhitzte Wasser sein müssen.

### III. Verbindung keramischer Massen mit Glas und Metall.

Die auch isoliertechnisch wichtige Aufgabe, keramische Massen hochvakuumdicht und temperaturwechselbeständig mit Glas zu verschmel-

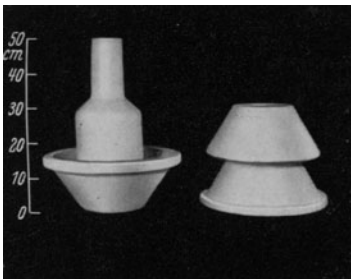


Abb. 111.  
Isolatoren aus Sipa für Elektrodampfkessel.

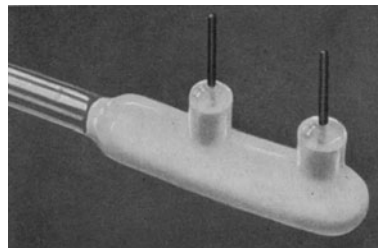


Abb. 112. Keramische Schaltröhre mit angeschmolzenem Glasrohr und gasdicht eingeschmolzener Metaldurchführung.

zen, kann heute als gelöst betrachtet werden. Es kommt dabei besonders auf die richtige Abstimmung der Wärmeausdehnungskoeffizienten von Glas gegenüber dem keramischen Stoff an. Einige Beispiele mögen derartige Ausführungen veranschaulichen. So zeigt Abb. 112 eine keramische Schaltröhre mit angeschmolzenem Glasrohr und gasdicht eingeschmolzener Metaldurchführung. Abb. 113 stellt ein keramisches Rohr mit Metalleinschmelzung an dem einen Ende und Glasflansch am anderen Ende dar.

Jedenfalls können bei geeigneter Herstellungsweise sowohl massive Metalldrähte unter Verwendung von Glas vakuumdicht in keramische Gefäße eingeführt werden, wie auch als sog. Metallhautdurchführungen. Es sind dies solche Durchführungen, bei denen auf ein keramisches Trägermaterial, also z. B. dünne Röhrchen oder Stäbchen, dünne Metallschichten als Stromleiter aufgeschmolzen werden.

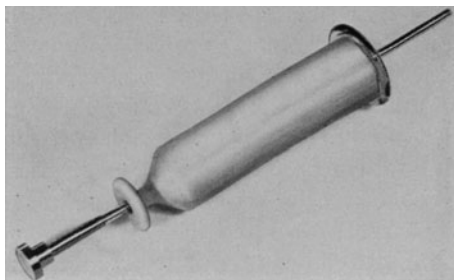


Abb. 113. Keramisches Rohr mit Metalleinschmelzung und Glasflansch.

Das Hauptkennzeichen dieser letzten Art von Durchführungen ist, daß die Metallhaut die Stromleitung, dagegen der keramische Träger die mechanische Festigkeit übernimmt. Da die aufgebraute Metallschicht außerordentlich dünn (von der Größenordnung einiger Tausendstel Millimeter) und infolgedessen äußerst elastisch ist, so ist eine solche Durchführung in hohem Maße frei von inneren Spannungen. Gleichzeitig kann bei der guten Wärmeableitung eine übliche Metallhautdurchführung der in Abb. 114 dargestellten Art ohne merkliche Erwärmung Ströme bis 10 A je Durchführung aufnehmen.

Außer diesen Metalleinschmelzungen ist es sogar gelungen, feste und vakuumdichte Anschmelzungen von Metall und keramischen Stoffen

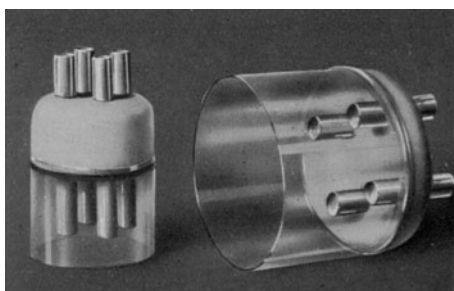


Abb. 114. Metallhaut-Durchführung.

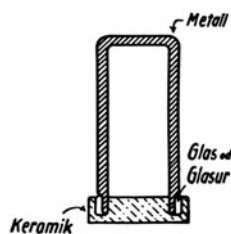


Abb. 115. Vakuumdichte Keramik-Metallverschmelzung.

herzustellen, indem man trotz stark abweichender Ausdehnungskoeffizienten beider Werkstoffe dem Metall an der Anschmelzungsstelle das Ausdehnungsverhalten des keramischen Stoffes aufzwingt, also beispielsweise das am Ende auf 0,1 mm Wandstärke verjüngte Metallrohr heiß auf das engere keramische Rohr aufschumpft und zur Dichtung ein

zum keramischen Isolierstoff passendes glasiges Schmelzmittel verwendet (Abb. 115). Auf diese Weise lassen sich beispielsweise Metallrohre mit keramischen Rohren oder Platten unmittelbar zusammenschmelzen. Wegen näherer Einzelheiten dieser vielseitigen Keramik-Glasverschmelzung sei auf das neuere Schrifttum<sup>1</sup> verwiesen.

## Schrifttum.

### I. Für Hartporzellan.

WEICKER, W.: Keramische Isolierstoffe in H. SCHERING: Die Isolierstoffe der Elektrotechnik, S. 110. Berlin: Julius Springer 1924.

Dasselbst ausführliche Angaben über das wichtigste bis 1924 vorliegende Schrifttum über Porzellan und Porzellanisolatoren.

— Zur Geschichte des Freileitungsisolators, in: Geschichtliche Einzeldarstellungen aus der Elektrotechnik, Bd. III. Berlin: Julius Springer 1932.

Dasselbst vollständiges Verzeichnis des bis 1932 vorliegenden Schrifttums über Freileitungsisolatoren.

Weiteres, vor allem neues Schrifttum:

HANDREK, H.: Porzellan als Werkstoff. Z. VDI 1927 S. 1553.

TREUFELS, H. VON: Die technischen Eigenschaften des Porzellans, Plastische Massen 1932. S. 93 u. 114.

DRAEGER, K.: Über die Materialfestigkeit von keramischen Isolatoren bei elektrischer Stoßbeanspruchung. Arch. techn. Messen Nr. 8 1932. (Vgl. ETZ 1933 S. 560.)

WEICKER, W.: Das Porzellan im Bau von Freileitungen und Schaltanlagen. ETZ Bd. 54 (1933) S. 565.

— Abnahmeprüfungen an Porzellanisolatoren. Arch. techn. Messen, Dezember 1933 V 8842—1.

OBENAU, F.: Durchschlagprüfung von Porzellanisolatoren. Arch. techn. Messen, Juli 1936 V 339—16.

RIEKE, R.: Die Herstellung des Elektroporzellans. ETZ Bd. 57 (1936) S. 469.

WEICKER, W.: Isolatoren für Freileitungen. ETZ Bd. 57 (1936) S. 1391.

TREUFELS, H. VON: Keramische Werkstoffe in der Hochspannungstechnik. ETZ Bd. 58 (1937) S. 473.

Zahlreiche einschlägige Aufsätze finden sich auch in den Hauszeitschriften der Hermsdorf-Schomburg-Isolatoren-Gesellschaft (Hescho-Mitteilungen), der Rosenthal-Isolatoren G. m. b. H. (Mitteilungen der Rosenthal-Isolatoren G. m. b. H.) und der Steatit-Magnesia A.-G. (Stemag-Nachrichten).

### II. Für keramische Sondermassen.

ALBERS-SCHÖNBERG u. GINGOLD: Neues Steatit als Isolierstoff für Hochfrequenz. ETZ Bd. 53 (1932) S. 205.

ALBERS-SCHÖNBERG u. STOERK: Lichtbogensichere Hochspannungsisolatoren aus einem neuen keramischen Werkstoff. Elektrizitätswirtsch. Heft 15 (1932) S. 327.

<sup>1</sup> HANDREK, H.: Neuartige Stromeinführungen in Vakuumgefäße. Z. techn. Phys. Bd. 15 (1934) S. 494. — Neuartige vakuumdichte Keramik-Metall-Verbindungen. Z. techn. Phys. Bd. 17 (1936) S. 456. — Vgl. auch ESPE-KNOLL: Werkstoffkunde der Vakuumtechnik. Berlin: Julius Springer 1936.

- WEICKER, W.: Porzellan und verwandte keramische Isolierstoffe. ETZ Bd. 54 (1933) S. 543.
- ALBERS-SCHÖNBERG, E.: Die Isolierstoffe der Steatitgruppe. ETZ Bd. 54 (1933) S. 545.
- ALBERS-SCHÖNBERG u. SCHUSTERIUS: Über den Durchschlag keramischer Massen in der Hitze und seine Abhängigkeit von Zusammensetzung und Brennweise. Elektrowärme Heft 7 (1933) S. 162.
- HANDREK, H.: Hochfrequenz-Isolierstoffe geringer Verluste und hoher Dielektrizitätskonstante. Z. techn. Phys. Bd. 15 (1934) S. 491.
- Keramische Isolierstoffe für Hochfrequenz. Z. VDI Bd. 78 (1934) Heft 50 S. 1441.
- Neue Hochfrequenz-Isolierstoffe. Hochfrequenztechn. 1934 S. 73.
- SOYCK, W.: Moderne keramische Baustoffe in der Hochfrequenzpraxis. Sächs. Ing.-Z. 1935 S. 84.
- Eigentümlichkeiten des dielektrischen Verhaltens rutilhaltiger Kondensator-Baustoffe. VDE-Fachber. 1935 S. 129.
- HANDREK, H.: Keramische Spezialmassen. Arch. techn. Messen, Februar 1935 Z 944—3.
- WEICKER, W., KUNSTMANN, E. und DEMUTH, W.: Eigenschaftstafel keramischer Werkstoffe, ETZ Bd. 56 (1935) S. 915.
- SOYCK, W.: Die physikalischen Eigenschaften der feinkeramischen elektrotechnischen Isolierstoffe. Feinmech. u. Präz. 1936 Heft 6, S. 93.
- Keramische Dielektrika. Schweizer Arch. angew. Wiss. Techn. Heft 7 (1936) S. 159.
- STEGER, W.: Die Verwendung von Porzellan und anderen keramischen Isolierstoffen in der Elektrotechnik. ETZ Bd. 57 (1936) S. 471.
- HANDREK, H.: Keramische Hochfrequenz-Kondensatoren. Arch. techn. Messen, August 1936 Z 136—1 (siehe auch Z 136—4).
- Keramische Werkstoffe in der Hochfrequenztechnik. ETZ Bd. 58 (1937) S. 475.
- ALBERS-SCHÖNBERG: Keramische Werkstoffe in der Installationstechnik ETZ Bd. 58 (1936) S. 474.

Hinsichtlich Calit, Frequenta, Condensa, Kerafar, Tempa und Diacond finden sich weitere ausführliche Angaben in der von der Hermsdorf-Schomburg-Isolatoren-Gesellschaft herausgegebenen Schriftenreihe „Keramische Sondermassen“ Heft I—15 sowie in den oben erwähnten Stemag-Nachrichten.



# Organische Isolierstoffe in der Hochspannungstechnik.

Von W. ESTORFF, Berlin.

Die Anwendung der organischen Isolierstoffe in der Hochspannungstechnik ist außerordentlich vielseitig und umfangreich. Um über dieses Gebiet einen Überblick zu gewinnen, gliedern wir die Isolierstoffe nach ihrem Aufbau in Trägerstoffe und Tränk- bzw. Bindemittel. Abb. 116 gibt in der ersten Zeile vier charakteristische Vertreter einer gro-

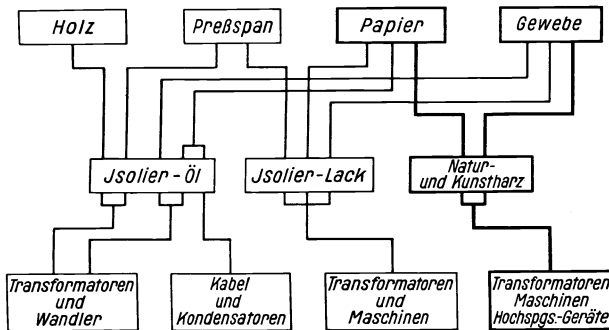


Abb. 116. Organische Isolierstoffe in der Hochspannungstechnik.

ßen Reihe von Trägerstoffen wieder, die zusammen mit den Ölen, Lacken und Harzen der zweiten Zeile die wichtigsten Hochspannungsisolierstoffe bilden. Der dritten Zeile sind die Anwendungsgebiete zu entnehmen. Bei den folgenden Ausführungen sollen die mit Isolieröl und Isolierlack getränkten Stoffe nicht behandelt werden; es wird nur auf die aus Faserstoffen und Harzen hergestellten geschichteten eingegangen. Gerade auf diesem Gebiete ist im Laufe der letzten 10 Jahre eine Reihe bemerkenswerter Fortschritte zu verzeichnen.

Der Hersteller der Hartpapiere und Hartgewebe, die nicht nur Werkstoffe der Hochspannungstechnik, sondern auch der Niederspannungs- und Fernmeldetechnik (vgl. S. 220) sind, muß mit den Forderungen, welche die Elektroindustrie an seine Erzeugnisse stellt, gut vertraut sein und in ständigem Gedankenaustausch mit dem Konstrukteur der elektrischen Geräte stehen. Da die Eigenschaften der Hartpapiere und -ge-

webe weitgehend von der Vorbehandlung ihrer Ausgangsstoffe: Faserstoff und Harz, abhängen, so muß der Hersteller andererseits auch mit der Papierfabrik, Spinnerei und Kunstharzfabrik in Fühlung bleiben und deren Betriebe soweit kennen, um in gemeinsamer Arbeit seinen Erzeugnissen die gewünschten Eigenschaften geben zu können. Die in der Isolierstofftechnik gemachten Fortschritte wirken sich technisch und wirtschaftlich so aus, daß sie höhere Beanspruchungen und dementsprechend kleinere Abmessungen der Geräte zulassen. Der Konstrukteur der Hochspannungsgeräte seinerseits kann die wertvollen Eigenschaften dieser Isolierstoffe nur dann voll ausnutzen, wenn er sie sinngemäß und richtig anwendet. Hierbei kann er den Rat des Herstellers der Hartpapiere und Hartgewebe nicht entbehren.

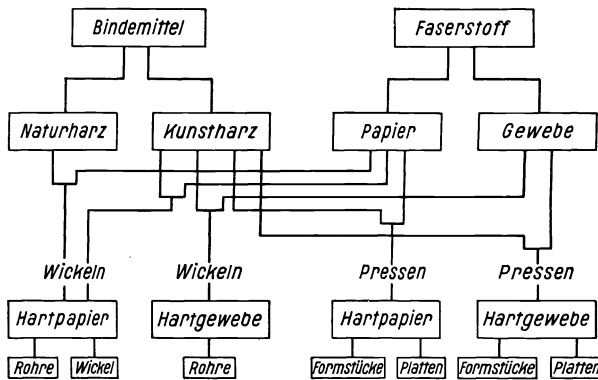


Abb. 117. Hartpapier und Hartgewebe. Herstellungsgang.

Die vielseitigen Anforderungen an die mechanischen und elektrischen Eigenschaften ließen sich nicht von einem Universalisolerstoff erfüllen, sondern es mußte eine große Anzahl von Stoffen mit verschiedenen Eigenschaften entwickelt werden. Abb. 117 gibt einen Überblick über den Aufbau und die Herstellungsverfahren der Hartpapiere und Hartgewebe und stellt gleichzeitig die Stoffeinteilung dar, nach der die Ausgangsstoffe und ihre Weiterverarbeitung im folgenden besprochen werden sollen.

### Papier und Gewebe als Träger.

Hochwertige Papiere wurden früher aus Lumpen oder Hadern von Leinen, Baumwolle, Flachs oder Hanf hergestellt. Für die Elektrotechnik kommen diese Rohstoffe ihres hohen Preises wegen kaum in Betracht. Die in der Hochspannungstechnik verwendeten Hartpapiere werden heute fast ausschließlich aus Zellstoffpapieren gefertigt. Die natürlichen Fasern des Holzes müssen zuerst von Lignin, Salzen und Harzen weitgehend

befreit werden. Das Holz von Kiefern und Tannen, vornehmlich aber von den harzarmen Fichten (30% Lignin), wird nach Entfernen der Rinde durch Sägen und Spalten zerkleinert und entweder mit Natronlauge, Natriumsulfat (Glaubersalz) oder schwefliger Säure bei einer Temperatur von rd. 120° bei mehreren Atmosphären Überdruck durch Kochen „aufgeschlossen“. Auf das Kochen folgt eine sorgfältige mehrfache Waschung, um die zum Aufschließen benutzten Chemikalien wiederzugewinnen und Elektrolyte, die später die isolierenden Eigenschaften mindern würden, soweit als möglich zu entfernen. Natronzellstoff und Sulfatzellstoff aus dem Holz von langsamer wachsenden Nadelhölzern nördlicher Breitengrade eignen sich am besten für hochwertige Isolierpapiere. Beim Aufschließen des Holzes mit Natronlauge erhält man einen Zellstoff mit geringerem Harzgehalt (0,05%) als nach dem Sulfitzverfahren (0,5% Harzgehalt). Der Natronzellstoff ist auch wärmebeständiger als der Sulfitzellstoff und wird deshalb für hochwertige Erzeugnisse bevorzugt. Vielfach werden Papiere aus Mischungen von Natron- und Sulfitzellulose hergestellt. Die Art des Zellstoffes, seine Aufbereitung und auch seine Mahlung sind von wesentlichem Einfluß auf die Saugfähigkeit des daraus bereiteten Papierses.

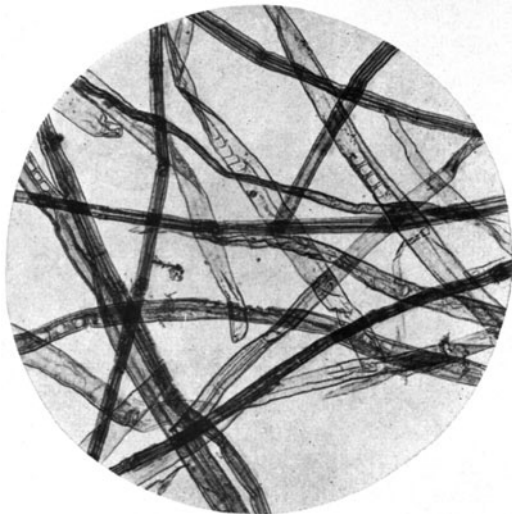


Abb. 118. Nadelholzzellstoff (Natronzellstoff). Vergr. 75fach (nach HERZBERG, KORN u. SCHULZE).

Abb. 118 zeigt vergrößert die etwa 3 mm langen bandartigen Fasern von Nadelholzzellstoff mit etwa 0,05 mm Breite, an denen man die einzelnen Zellen und die für Nadelholz charakteristischen „Tüpfel“ erkennt.

Die Rohzellulose wird zunächst in einem Kollergang zerkleinert. Der Zellstoff wird dann reichlich mit Wasser versetzt (1 : 15 bis 1 : 30) in den Holländer „eingetragen“, dessen Walzen mit Messern ausgerüstet sind, die zusammen mit dem Grundmesserwerk am Boden des Gefäßes, dem sog. „Holländergeschirr“, die Fasern zerkleinern. Die Messer können in ihrer Höhe verstellt werden. Für besondere Papiere werden Walzen und Grundwerke aus Stein gewählt. Die Art der Mahlung ist für die

physikalischen Eigenschaften des fertigen Papiers von wesentlicher Bedeutung. Sie ist verschieden nach der Einstellung der Holländerwalzen, der Art des Eintrages, der Mahldauer und -geschwindigkeit und nach der Art der Zellulose und ihrer Vorbehandlung.

Man unterscheidet zwischen

1. „rösch“ gemahlenem Papier, bei dem die Fasern des Zellstoffes im wesentlichen unversehrt erhalten oder leicht verkürzt sind, und

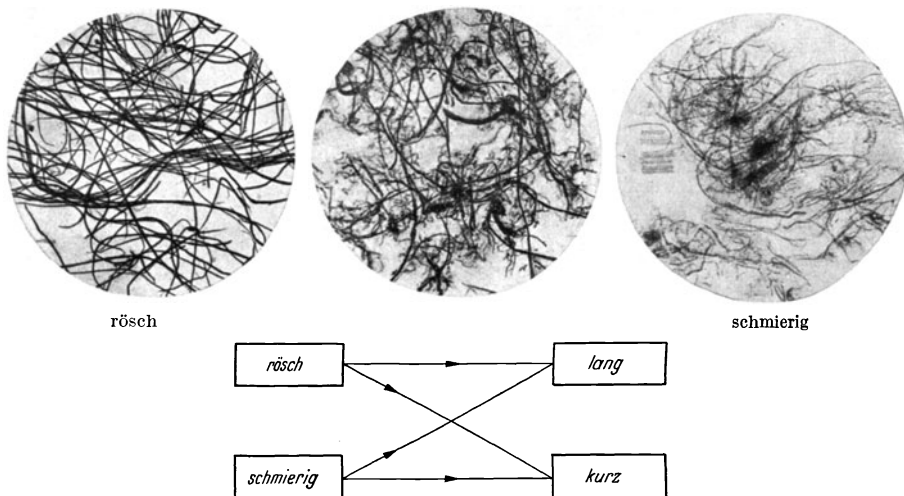


Abb. 119. Mahlarten von Papieren. Verg. 12,5 fach.  
(nach HERZBERG, KORN u. SCHULZE).

2. *schmierig* gemahlenem, bei dem die Fasern in Fibrillen zerlegt und im Grenzfall zu einer gefügelosen schleimigen Masse zermahlen sind.

Bei beiden Mahlarten können die Fasern lang oder kurz gemahlen sein. Das rösche Papier ist saugfähiger und luftdurchlässiger quer zur Schicht als das schmierig gemahlene, weniger saugfähigere, aber dichtere Papier. Zwischen diesen beiden Mahlarten gibt es zahllose Zwischenstufen. Abb. 119 zeigt die Unterschiede im Aussehen der Fasern des Papiers unter dem Mikroskop bei röscher und bei schmieriger Mahlung und in dem mittleren Bilde bei einer Stufe zwischen röscher und schmieriger Mahlung. Bei den gewählten Beispielen<sup>1</sup> handelt es sich freilich nicht um Zellstoffpapiere. Links ist ein Manilapapier von großer Reißlänge, in der Mitte ein Leinenpapier für Aktenzwecke und rechts ein Leinenpapier für Banknoten wiedergegeben, an denen die charakteristischen Unterschiede der Mahlung am besten kenntlich sind. Für die

<sup>1</sup> Aus W. HERZBERG, KORN u. SCHULZE: Papierprüfung. Eine Anleitung zum Untersuchen von Papier. 7. Aufl. Berlin: Julius Springer 1932.

Hartpapierherstellung werden überwiegend rösch gemahlene Papiere verwendet.

Die Dicke (das Gewicht) des Papiers richtet sich nach dem Verwendungszweck und wird in  $\text{g}/\text{m}^2$  angegeben. Diese Zahl ist zufällig angenähert gleich der Papierdicke in  $1/1000$  mm. Zu Hartpapier werden Papiere von etwa  $30\text{--}100\text{ g}/\text{m}^2$  verarbeitet. Die Papierbahn soll auf der ganzen Breite und Länge überall gleichmäßige Dicke („Bogenhöhe“) aufweisen und frei von Flecken und Wolken sein, die auf Ungleichmäßigkeiten in der Zubereitung hinweisen und sich durch geringere Durchschlagspannungen an diesen Stellen störend bemerkbar machen.

Die Papiere werden in Längs- und Querrichtung auf Zerreißfestigkeit geprüft, die als „Reißlänge“ angegeben wird, d.h. als Länge des Papierstreifens von gleichbleibendem Querschnitt, der sich gerade selbst noch tragen kann. Für Papiere, die zur Herstellung von Hartpapierwickeln und -rohren dienen sollen, muß eine höhere Reißlänge gefordert werden, als für solche, die zu Hartpapierplatten verarbeitet werden sollen. Das Herstellungsverfahren des Papiers bringt es mit sich, daß die Zerreißfestigkeit in der Querrichtung nur etwa halb so groß ausfällt, wie in der Längsrichtung der Bahn. Es werden Papiere von  $9\text{--}12$  km Reißlänge in der Längsrichtung und etwa  $4\text{--}7$  km in der Querrichtung verwendet.

Zur Ermittlung der Widerstandsfähigkeit des Papiers gegen Knittern wird in besonderen Maschinen die „Falzzahl“ ermittelt, die angibt, wie oft ein Papierstreifen geknifft werden kann, bis Bruch der Fasern an der Kniffstelle erfolgt.

Die Saugfähigkeit des Papieres, die man durch Feststellen der Saughöhe von reinem Wasser in einem  $15\text{--}20$  mm breiten Papierstreifen innerhalb einer bestimmten Zeit, z.B. einer Stunde, in Millimetern ermittelt, ist für den Hersteller von Hartpapier von besonderer Bedeutung. Je harzreicher das fertige Erzeugnis werden soll, um so saugfähiger muß der Träger gewählt werden. Gewöhnliche Papiere weisen  $15\text{--}20$  mm Saughöhe, hochsaugfähige eine solche von  $40\text{--}60$  mm und mehr auf. In besonderen Fällen ist eine Saugfähigkeit des Rohpapiers durchaus unerwünscht. Dies gilt z.B. für die hochwertigen Hartpapierwickel und -rohre mit Naturharzbindung, die nur einen geringen Harzgehalt aufweisen dürfen. Nur in diesem Falle konnte man bisher geleeimtes Papier, das man durch Beigabe von harzsaurem Natrium zu dem Inhalt des Holländerbottichs herstellt, nicht entbehren. Die Ausfällung des Harzes auf die Papierfaser erfolgt im Holländer durch Beigabe von Aluminiumsulfatlösung. Das harzsaure Natrium wird meist durch Kochen von Kolophonium mit Soda- oder Natronlauge gewonnen. Die geleeimten Papiere erfahren zumeist vor dem Verlassen der Papierfabrik noch eine mäßige Verdichtung und Oberflächenglättung durch „Satinieren“ oder „Kalandrieren“ zwischen hochglanzpolierten Walzen. Die mechanischen

Eigenschaften des Papieres werden durch das Satinieren verbessert. Für Kunstharzpapiere werden in fast allen Fällen ungeleimte Papiere verwendet, sie werden „maschinenglatt“, d.h. unsatiniert verarbeitet.

Der Aschengehalt des Rohpapiers, der einen Maßstab für seine Reinheit bildet, soll den Wert von 1% nicht übersteigen. Die Luftdurchlässigkeit quer zur Schicht soll für Hartpapierzwecke ähnlich klein sein, wie bei den Kabel- und Kondensatorpapieren.

Die rohen und die lackierten Papiere müssen sorgfältig auf Gleichmäßigkeit ihrer physikalischen Eigenschaften für den gedachten Verwendungszweck überwacht werden.

Statt des Papieres verwendet man Gewebe mit ihren größeren Faserlängen, sobald von dem Isolierstoff vorzügliche mechanische Eigenschaften, hohe Zerreiß-, Biege- und Schlagbiegefestigkeit gefordert werden. Die Anordnung der Fasern in dem Gewebe erlaubt die Unterbringung eines höheren Harzanteils als bei Hartpapier und ergibt damit vor allem eine größere Unempfindlichkeit gegen den Einfluß von hoher Luftfeuchtigkeit und Wasser.

Von den Gespinsten kommen Leinen und Seide ihres Preises wegen für die Herstellung von Hartgewebekörpern nicht in Betracht, es wird hierzu fast ausschließlich Baumwolle unter den Handelsbezeichnungen Segeltuch, Nessel, Batist usw. verwendet, die verschiedene Feinheit des Gewebes kennzeichnen. „Nessel“ hat z.B. ein Gewicht von etwa  $150 \text{ g/m}^2$ , Batist von etwa  $100 \text{ g/m}^2$ . Heute wird der Baumwolle bestimmter Garnstärke ein gewisser Mindestzuschlag von Stapelfaser, d.h. Kunstseide mit 10—70 mm Faserlänge, beigefügt.

## Natur- und Kunstharze als Tränk- und Bindemittel.

Die im vorigen Abschnitt behandelten Träger Papier und Gewebe werden mit Natur- oder Kunstharzen als Bindemitteln unter Anwendung von Druck und Wärme zu geschichteten Isolierstoffen verarbeitet.

Von den Naturharzen wird bei den Isolierstoffen der Hochspannungstechnik nur der Schellack verwendet. Dieses Harz wird auf verschiedenen indischen Gummibaumarten gewonnen, auf deren Trieben, Zweigen und Blättern sich die Larven der Lackschildlaus ansiedeln. Die Larven ernähren sich vom Saft der Triebe und scheiden je nach dem Ort verschieden reine Arten von Lack aus, die an der Luft rasch erhärten und die Tiere als sog. „Stocklack“ umschließen. Der Stocklack wird gesammelt, gereinigt, umgeschmolzen und kommt als Schellack in mehreren Sorten (Granat-, Orange- und Lemonschellack) in den Handel. Er enthält neben anderen Verunreinigungen gewisse Mengen von Wachs, die durch Kochen mit Sodalauge verseift und entfernt werden können. Schellack wird bei der Herstellung organischer Isolierstoffe nur für Hart-

papierwickel, wie Durchführungen und Rohre verarbeitet, die elektrisch hoch beansprucht werden und nur geringe Verlustzahlen aufweisen dürfen. Ein bemerkenswerter Vorzug der mit Schellack hergestellten Isolierkörper ist die sehr geringe Neigung zur Bildung von Kriechpfaden (vgl. S. 209) auf der Oberfläche unter dem Einfluß elektrischer Beanspruchung. Diese Eigenschaft ist auf das geringe Leitvermögen der verkohlten Rückstände zurückzuführen; Kunstharze verhalten sich in dieser Hinsicht wesentlich ungünstiger. Frischer Schellack schmilzt bei einer Temperatur von etwa  $90^{\circ}$ . Die damit hergestellten Hartpapierkörper hätten den Nachteil einer geringen Wärmebeständigkeit, wenn nicht der Schellack während des Herstellungsvorganges durch die damit verbundene

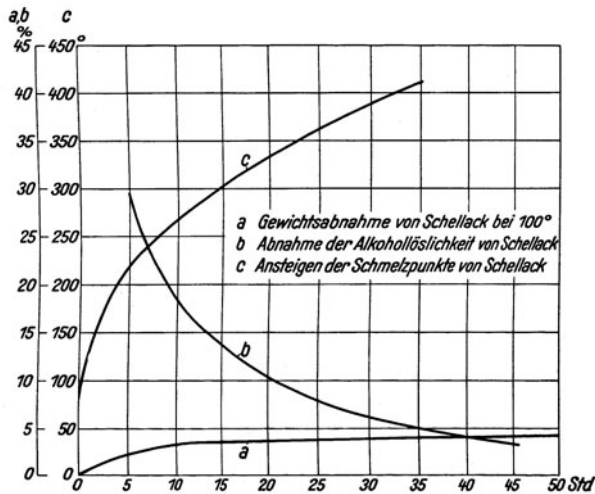


Abb. 120. Veränderung von Schellack bei Dauererwärmung auf  $100^{\circ}$  nach Dr. STÄGER.

Wärmebehandlung eine gewisse Härtung erführe. Abb. 120 zeigt nach Angaben von H. STÄGER<sup>1</sup>, daß nach 30 stündiger Erwärmung (Backen) bei  $100^{\circ}$  der Schmelzpunkt allmählich von  $90$  auf  $375^{\circ}$  ansteigt, wobei durch einen Kondensationsvorgang eine Gewichtsabnahme von etwa 4% stattfindet. Gleichzeitig nimmt die Löslichkeit in Alkohol stark ab. Der Schellack wird in vergälltem Äthylalkohol (Spiritus) aufgelöst und mit der Lackiermaschine auf den Träger aufgebracht. Schellackpapiere können nur nach dem Wickelverfahren verarbeitet werden. Das Härten des Schellackbindemittels der Wickel erfolgt im Ofen bei Temperaturen von  $100$ — $130^{\circ}$ . Je geringer die Temperatur, desto länger dauert zwar der Härtevorgang, um so geringer ist aber die Gefahr der Spaltenbildung durch den entweichenden Wasserdampf und um so hochwertiger wird das Erzeugnis, während Behandlung bei höheren Temperaturen einen Teil

<sup>1</sup> STÄGER, H. Elektrotechnische Isoliermaterialien. Stuttgart 1931.

des chemisch gebundenen Wassers der Zellulose entzieht und das Papier dadurch „kurzbrüchig“ macht.

Von den mannigfachen Arten der heute erzeugten Kunstharze haben sich für die Herstellung von Hartpapier und -gewebe nur die auf der Grundlage von Phenol bzw. Kresol und Formaldehyd aufgebauten (Abb. 121) eingeführt. Kresol und Phenol werden durch trockene Destillation aus der Steinkohle gewonnen. Das Rohkresol enthält die drei bekannten Modifikationen Meta-, Para- und Orthokresol, von denen die erste die wichtigste ist. Der zweite Ausgangsstoff für die Herstellung der Kunstharze, das Formaldehyd, wird durch Oxydation von Methylalkohol gewonnen, der früher durch trockenes Destillieren von Holz er-

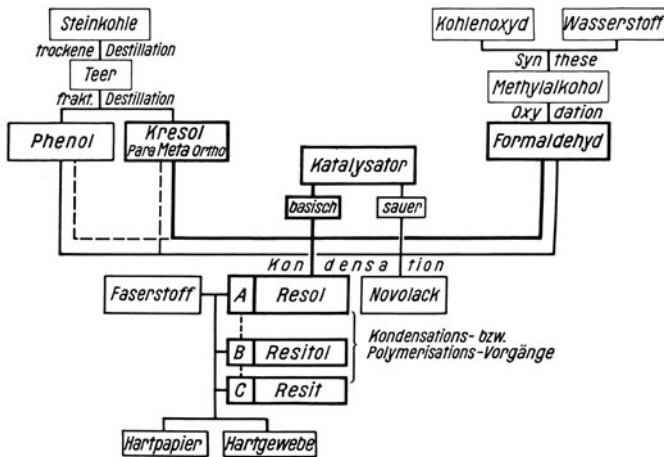


Abb. 121. Kunstharzisollerstoffe. Herstellungsgang.

halten wurde. Heute wird der Methylalkohol durch Wasserstoffanlagerung an Kohlenoxyd (Hydrieren) hergestellt. Die Ausgangsstoffe, Kresol oder Phenol oder eine Mischung beider, werden zusammen mit Formaldehyd in einem Autoklaven unter Vakuum erhitzt, wobei sie unter Wasserabspaltung zu einem zunächst flüssigen, später erstarrenden Harz im Zustand A kondensieren. Dieser Vorgang vollzieht sich leichter und wirtschaftlicher in Anwesenheit eines ihn anregenden Mittels, eines Katalysators, der eine Base (z. B. Ammoniak) oder eine Säure sein kann. Der basisch beeinflusste Kondensationsvorgang liefert das Resol, ein schmelzbares und in Alkohol oder Azeton lösliches Harz. Die hierbei ablaufenden chemischen Vorgänge sind im einzelnen noch nicht völlig geklärt. Je nach Wahl der Ausgangsstoffe und der bei der Kondensation angewandten Temperatur und Zeit lassen sich eine Reihe verschiedenartiger Erzeugnisse erhalten, die den einzelnen Verwendungszwecken angepaßt werden können.



Unterwirft man das Resol unter Anwendung von Druck einer Erwärmung von 100—150°, so geht es (bei höherer Temperatur schneller) unter weiterer Kondensation und Wasserabspaltung, verbunden mit molekularer Umlagerung (Polymerisation), in den B-Zustand, in Resitol über, das zwar noch schmelzbar und in Alkohol quellbar, aber nicht mehr löslich ist. Weitere Erwärmung führt bei fortschreitender Kondensation und Polymerisation zu dem Resit, dem C-Zustand, einem Enderzeugnis, das weder schmelzbar noch in Alkohol oder Azeton quellbar oder löslich ist.

Phenolformaldehydharze zeigen bei dem Kondensationsvorgang gegenüber Kresolformaldehydharzen eine unerwünscht stärkere Wasserabspaltung, wobei das Wasser in die Poren des Zellstoffes eindringt, aus denen es sich nur schwer wieder entfernen läßt. Bei dem Phenolharz überwiegt die Kondensation gegenüber der Polymerisation. Kresolformaldehyd-Erzeugnisse spalten weniger Wasser ab, bei ihnen überwiegt die Polymerisierung. Sie werden deshalb bei der Herstellung von Hartpapier und Hartgewebe für die Hochspannungstechnik fast ausschließlich angewendet.

Bei Benutzung eines sauren Katalysators entsteht ein nicht härtpbares Harz, der Novolack, der meist auf Phenolgrundlage aufgebaut wird. Durch Hinzufügen von Formaldehyd im Überschuß entsteht ebenfalls ein härtpbares Resol, dessen elektrische Eigenschaften jedoch wesentlich schlechter als die des basisch gewonnenen sind, da sich die Ladungsträger nicht wie bei Ammoniak als basischem Katalysator durch Erhitzen wieder entfernen lassen. Auf den Novolack soll hier nicht weiter eingegangen werden.

### **Das Aufbringen des Harzes auf den Träger.**

Der Auftrag und die Vereinigung des Harzes mit dem Trägerstoff müssen möglichst gleichmäßig erfolgen. Man verwendet hierzu Lackiermaschinen, wie eine solch ein Abb. 122 im Grundaufbau angedeutet ist. Die Faserstoffbahn wird von dem Rohpapierwickel über Umlenkwalzen zu der aus Gummi bestehenden Lackierwalze geführt. Diese Walze ist einer meist aus Metall bestehenden Lackübertragungswalze gegenüber angeordnet. Diese wieder dreht sich in einem Troge, der mit aufgelöstem Harz gefüllt ist, das etwa die Viskosität von dünnflüssigem Honig hat. Durch Vergrößerung oder Verkleinerung des Abstandes beider Walzen läßt sich die Dicke der auf den Träger aufzubringenden Harzschicht verändern. Die Konzentration der Harzlösung muß mit einer Senkwaage überwacht und dauernd gleichgehalten werden. Seltener wird das Harz in Pulverform oder nach anderen Verfahren auf den Träger aufgebracht und durch Schmelzen mit ihm verbunden. Das

beim Lackieren mit aufgetragene Lösungsmittel verdunstet beim Durchlauf durch einen geheizten Trockenraum und entweicht entweder durch einen Abzug ins Freie oder kann zu weiterer Verwertung in einer entsprechenden Anlage wiedergewonnen werden. Je nach der Art und Stärke des Harzauftrages wird die Temperatur des Trockenraumes und die Laufgeschwindigkeit der Faserstoffbahn in diesem eingestellt.

Faserstoffbahnen mit Kunstharzauftrag altern im Laufe der Zeit, indem das aufgebrauchte Harz schon bei Raumtemperatur allmählich aus dem A-Zustand in den für die Weiterverarbeitung unverwendbaren C-Zustand übergeht. Der Lagerung der fertig lackierten Vorratswickel ist besondere Aufmerksamkeit zuzuwenden. Der Harzauftrag wird meist in Hundertteilen des Rohpapiergewichtes angegeben und je nach dem

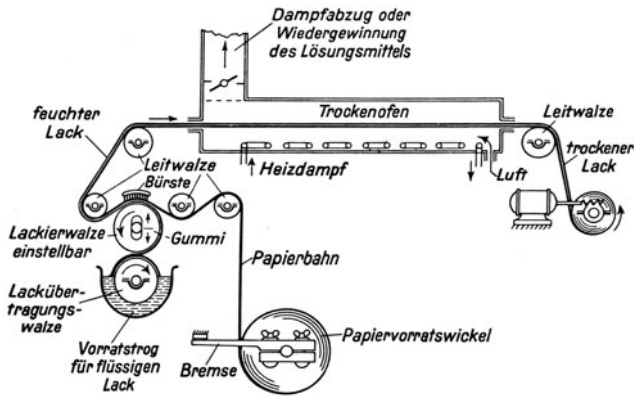


Abb. 122. Papier-Lackiermaschine.

Verwendungszweck verschieden gewählt. Zweiseitig lackierte Bahnen werden meist durch zweimaliges aufeinanderfolgendes Lackieren und Trocknen erhalten. Sie werden nur selten benötigt. Hoher Harzgehalt gibt im allgemeinen weniger feuchtigkeitsempfindliche Hartpapiere, die aber geringere elektrische Eigenschaften aufweisen. Elektrisch hochwertige Papiere versieht man meist mit geringem Harzauftrag, muß dafür aber eine gewisse Feuchtigkeitsempfindlichkeit in Kauf nehmen. Hartgewebe bedürfen zum Auffüllen der Zwischenräume zwischen den aus Fasern zusammengesetzten Fäden wesentlich größerer Harzmengen als Hartpapiere.

Die Tafel auf S. 165 gibt einen, natürlich nur angenäherten Überblick über die mechanischen und elektrischen Eigenschaften der Hartpapiere und Hartgewebe in Hinsicht auf ihren Gehalt an Harz. In dieser Darstellung ist die Summe der prozentualen Anteile von Träger und Harz jeweils gleich Hundert gesetzt.

Die mannigfaltigen Sorten von Papieren und Geweben mit verschie-

## Hartpapier und Hartgewebe. Einfluß des Harzgehaltes.

Erzeugnis		Eigenschaften						
Träger	Harz	Druck- Festigkeit	Zug- Festigkeit	Schlag- Biege- festigkeit	Verlust- zahl tg δ	Durchschlags- Festigkeit		Saug- fähig- keit
0%	100%					längs	quer	
Hartgewebe	Super-Hartpapiere	groß	mittel	sehr groß klein	groß	klein	klein	klein
Super-Hartpapiere								
Rohre, Platten, Form- stücke m. Kunstharz	Rohre, Durchführun- gen mit Schellack	mittel	groß	mittel	mittel klein	groß mittel	mittel groß	mittel groß
Rohre, Durchführun- gen mit Schellack								
	100%	klein	groß	groß	sehr klein	klein	groß	sehr groß

denem Harzgehalt ergeben bei der Verarbeitung unter verschiedenen Drücken und Temperaturen, die im folgenden behandelt werden, eine Vielzahl von Erzeugnissen, die voneinander erheblich abweichende Eigenschaften haben. Die wertvollen Eigenschaften dieser Stoffe lassen sich, wie schon zu Beginn dieser Ausführungen betont, nur dann voll ausnutzen, wenn der Konstrukteur sie sinngemäß und in richtiger Weise anwendet. Deshalb sollte er diese Isolierstoffe und ihre Eigenschaften eingehend kennenlernen und den Rat des Herstellers der Hartpapiere und -gewebe einholen.

### Das Wickeln und Härten.

Die Herstellung der Hartpapierrohre erfolgt auf der Wickelmaschine (Abb. 123) unter Anwendung von Druck und Wärme. Der Druck wird durch festes Spannen der Papierbahn mittels einer Bremse und bei den meisten Maschinen zusätzlich durch eine Druckwalze erzeugt. Das für die Rohrherstellung verwendete Papier muß eine große Reißlänge haben, um ein gutes Gefüge zu erzielen. Der Wickel liegt unten auf zwei mittels Dampf, Gas, Flüssigkeit oder elektrisch auf 100 ... 130° beheizten Walzen. Die obere, dritte Walze ist meist unbeheizt. Beim Wickeln muß neben dem Überwachen der Wanddicke durch Ablesen der Dornumdrehungen an einem Zählwerk der Durchmesser oder die Wanddicke an beiden Rohrenden von Zeit zu Zeit nachgeprüft werden, da ungleiche Durchmesser verschiedene große Zugkräfte in der Papierbahn und einseitig schwammige, unbrauchbare Wickel ergeben. Die Einwirkung der Wärme auf das Papier beim Wickeln ist nur so kurzzeitig, daß zwar der Harzauftrag erweicht und bindet, aber noch nicht in den unlöslichen und

unsmelzbaren Zustand übergeführt wird. Nach dem Verlassen der Wickelmaschine bringt man deshalb die Wickel in Härteöfen. Man beläßt sie dabei auf den Wickeldornen, um ihre Formbeständigkeit zu gewährleisten. Je nach der Höhe der Backtemperatur, die von  $100 \dots 140^\circ$

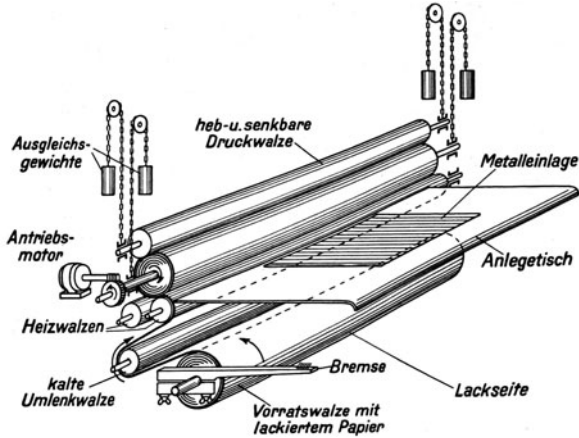


Abb. 123. Wickelmaschine für Hartpapier-Durchführungen.  
Hartpapier- und Geweberohre.

gewählt werden kann und je nach den Abmessungen des Wickels vollzieht sich die Härtung langsamer oder schneller, in einigen Tagen oder wenigen Stunden. Das Härten bei niedrigen Temperaturen gibt dem Erzeugnis

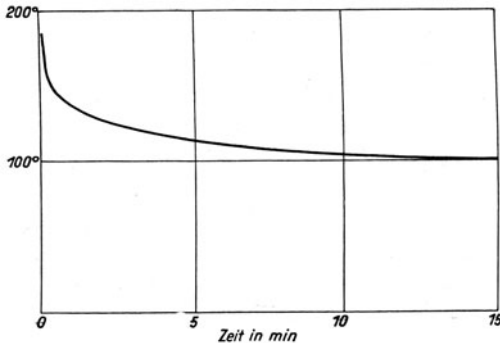


Abb. 124. Kresol-Formaldehyd-Harz. Härtungsdauer.

hochwertigere mechanische und elektrische Eigenschaften, da das bei der Kondensation abgespaltene Wasser Zeit hat, langsam aus den Stirnseiten als Dampf zu entweichen, während bei höheren Temperaturen häufig die Klebung zwischen zwei Papierlagen durch hohe Überdrücke zerstört wird und Spaltfugen auftreten. Abb. 124 gibt die

Zeit an, welche die Harzschicht auf einem Papierbogen braucht, um aus Resol völlig in Resit umgewandelt zu werden. Bei  $100^\circ$  sind hierzu rd. 16 min gegen 0,8 min bei  $140^\circ$  erforderlich. Bei Rohren, insbesondere solchen größerer Wandstärke, ist neben Sicherheitszuschlägen zusätzlich die Zeit in Rechnung zu stellen, welche die Wärme braucht, um bei der geringen Wärmeleitfähigkeit des Hartpapiers in die inneren Schichten

des Rohres einzudringen. Dies ist besonders bei der Härtung von Durchführungen größeren Durchmessers zu beachten.

Rohre von großem Durchmesser können gelegentlich zum Isolieren der Ober- gegen die Unterspannungswicklungen von Transformatoren verwendet werden. Solche und axial hoch beanspruchte Rohre dürfen nur wenig von Öl durchdrungen werden und müssen eine hohe Durchschlagsfestigkeit in Achsrichtung aufweisen, um die Abmessungen der Geräte kleinhalten zu können. Abb. 125 zeigt das stark unterschiedliche Verhalten von zwei Hartpapierrohren „a“ und „b“ nach verschiedenen Herstellungsverfahren hinsichtlich ihrer Verlustzahl unter Öl in Abhängigkeit von dessen Temperatur. Während das Rohr b wegen des starken Anwachsens seiner Verluste mit der Temperatur als unbrauch-

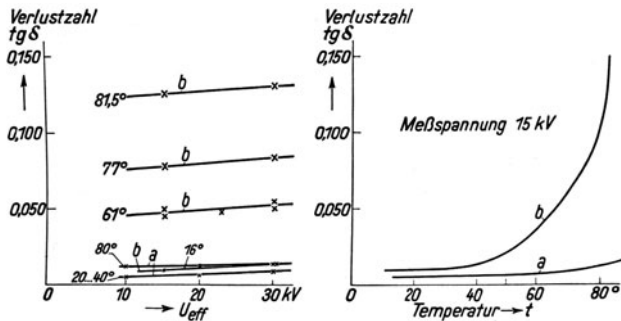


Abb. 125. Hartpapierrohr 75/40  $\varnothing$  mm (Kresol-Formaldehyd-Harz).  
Verlustzahl bei Temperaturen bis 80°.

bar zu bezeichnen ist, sind die Eigenschaften des Rohres a zufriedenstellend. Die in Abb. 125 dargestellten Schaulinien stellen das Ergebnis einer größeren Versuchsreihe dar. Hierbei waren die Ausgangsstoffe sowie deren mengenmäßige Zuordnung und ihre Wärmebehandlung planmäßig verändert worden.

Rohre, welche die soeben erwähnten Bedingungen erfüllen sollen, müssen ganz anders aufgebaut werden als z. B. die Rohre von Stützisolatoren für Innenraumtrennschalter. Die entsprechenden Sondereigenschaften werden durch Wahl der Papierstärke und Menge des Harzauftrages erreicht. Auch hier müssen Konstrukteur und Hartpapierhersteller stets zusammenarbeiten.

Bei der Verwendung von Hartpapierrohren unter Öl muß der Konstrukteur darauf achten, daß die Beanspruchung der Rohre in der Achsrichtung nicht den Wert ihrer Durchschlagsfestigkeit erreicht oder gar übersteigt. Das in Abb. 126 links wiedergegebene Feldbild zwischen scharfkantigen, unmittelbar auf der Oberfläche des Rohres aufliegenden Elektroden ergibt an den einander zugewandten Rändern Feldstärken, deren Axialkomponenten beträchtlich zu hoch für den Isolierstoff sind.

Unterhalb des linken Feldbildes ist die ungleichmäßige Potential- und Feldverteilung entlang der Rohroberfläche aufgetragen. Durch geeignete Ausbildung der Elektroden kann man die Oberfläche des Rohres neben

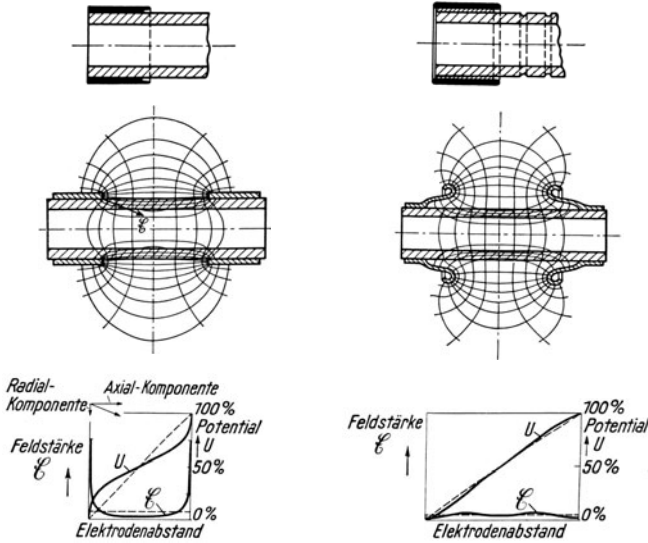


Abb. 126. Elektrodenform und Feldverteilung bei Isolierrohren.

den Elektroden soweit entlasten, daß das Rohr auf seiner ganzen Länge angenähert gleichmäßig beaufschlagt wird. Unterhalb des rechten Feld-

linienbildes ist die für diese Elektrodenform gültige günstigere Potential- und Feldverteilung entlang der Rohroberfläche aufgetragen. Diese Elektrodenform wurde mit Erfolg bei dem Bau von Ölschaltern für 220 kV verwendet. Häufig genügen bereits einfachere Mittel, z. B. eine mäßige Verrundung der auf das Rohr aufgebrachten Metallschellen, wie oberhalb des linken Feldbildes der Abb. 126 angedeutet ist. In

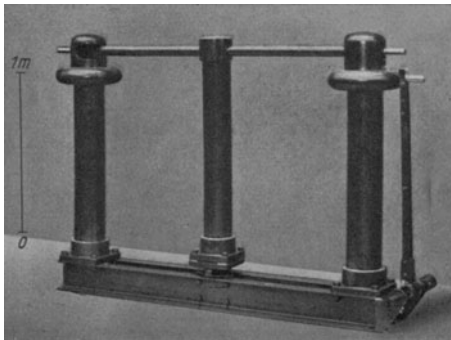


Abb. 127. Innenraum-Drehtrennschalter 100 kV, 600 A.

besonderen Fällen hat sich bei Anwendung von Rohren unter Öl das Eindrehen von Rillen (Abb. 126, rechts oben), nahe an den Elektroden in die Papieroberfläche bewährt. In den Rillen wird das Öl mit seiner in allen

Richtungen gleichen Durchschlagsfestigkeit mit den hochbeanspruchten Oberflächenschichten in Reihe geschaltet und verhindert dadurch den Längsdurchbruch entlang der obersten Papierschichten.

Abb. 127 zeigt einen Innenraum-Drehtrennschalter der Reihe 100, dessen Stützisolatoren aus gewickelten Hartpapierrohren bestehen. Das rohrförmige Messer dieses Schalters ist mit einem Hartpapierrohr umkleidet und wird von einem mittleren Drehisolator getragen, dessen Kopfarmatur frei von Metall ist. Durch diese Ausbildung ist es gelungen, störende Aufladungen des Messers durch Vorentladungen an den Kappen der Außenstützer zu vermeiden und die Überschlagnspannung über die offene Trennstrecke den VDE-Vorschriften anzupassen.

Abb. 128 zeigt im oberen Teile das rohrförmige Schaltgefäß eines Expansionschalters der Reihe 100 für Freiluft, das zum Schutz gegen die Witterung von dem unten in der Abbildung befindlichen Überwurf aus Porzellan umgeben wird. Das Rohr ist mit aufgenieteten Stahlgußflanschen versehen, überträgt große mechanische Beanspruchungen und ist imstande, hohen inneren Drücken standzuhalten.

Bezüglich der Prüfung von Rundrohren wird auf die „Leitsätze für gewickelte Hartpapierrohre mit kreisförmigem Querschnitt“, VDE 0325, und besonders auf die dazu gehörigen Erläuterungen verwiesen, in denen Prüfvorschriften für die Untersuchung der mechanischen und elektrischen Eigenschaften und des Verhaltens der Rohre in der Wärme aufgestellt und die zulässigen Grenzwerte für diese Eigenschaften angegeben sind. Diese Leitsätze enthalten auch Angaben über die Stufung der Isolierrohrquerschnitte und über die Durchmesser der Wickeldorne.

Abb. 129 zeigt die verschieden große Wasseraufnahme von Rohren verschiedener Herstellung aus Hartpapier und Hartgewebe in Abhängigkeit von der Zeit des Lagerns unter Wasser. Rohr „a“, ein elektrisch hochwertiges Erzeugnis mit niedrigem Harzgehalt, hat nach Ablauf zweier Jahre nahezu 60% Wasser aufgenommen, ist stark gequollen und hat seine Abmessungen verändert. Rohr „b“ aus Hartgewebe mit hohem Harzgehalt und Rohr „c“, ein Super-Hartpapier zeigen Wasseraufnahmen von 8—6% und sind formbeständig geblieben. Heute sind Rohrkörper mit nur 4% Wasseraufnahme und darunter herstellbar.

**Durchführungen** nach dem NAGELschen Kondensatorprinzip werden ähnlich wie Rohre hergestellt. In Abb. 123 ist das Einführen eines Metallbelages in den Papierwickel beim Wickeln dargestellt. Die Maschine muß



Abb. 128. 100 kV-Freiluft-Expansionschalter. Schaltgefäß.

hierzu jedesmal kurzzeitig angehalten werden, was bei Schellackbindung ohne weiteres möglich ist. Bei Kunstharzbindung ist darauf zu achten, daß der Lack hierbei nicht an den Heizwalzen vorzeitig in den C-Zustand übergeht; er würde dann nicht mehr kleben und Längsspalten im Wickel zurücklassen. Die auf den vorgeschriebenen Außendurchmesser gewickelte Durchführung erhält eine straff aufgewickelte Bandage aus meist unmagnetischem Draht, mittels deren sie in einen Flansch eingekittet oder eingeklemmt wird. Durchführungen bis etwa  $2\frac{1}{2}$  m Gesamtlänge können aus einer fortlaufenden Papierbahn hergestellt werden. Für Durchführungen größerer Länge bedient man sich in den Vereinigten Staaten, ähnlich wie bei der Kabelherstellung, des sog. Spiralwickelverfahrens mit mehreren parallel auflaufenden Papierbändern.

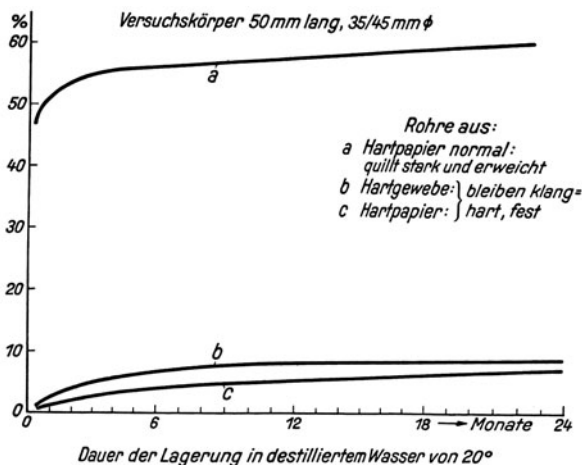


Abb. 129. Wasseraufnahme von Hartpapier- und Hartgeweberohren.

Zur Überwachung der Herstellung bestimmt man an der fertigen Durchführung die Verlustzahl mit der SCHERING-Brücke, neuerdings vorteilhaft nach dem Verfahren von KEINATH mit Selbstschreibern, wobei die Verluste in Abhängigkeit von der angelegten Spannung oder in Abhängigkeit von der Zeit bei konstanter Spannung unmittelbar aufgezeichnet werden. Im allgemeinen soll der Knick der über der Spannung aufgetragenen Verlustzahlkurve (Abb. 130) nicht unterhalb des 0,75fachen Wertes der Nennspannung der Durchführung liegen. Durchführungen, die dieser Bedingung entsprechen, befinden sich seit zwei bis drei Jahrzehnten anstandslos in Betrieb. Ferner soll die Verlustzahl bei der Prüfspannung innerhalb einer Prüfdauer von 5 min nicht nennenswert ansteigen; vgl. auch S. 86.

Die Größe der über der Spannung aufgetragenen Verlustzahl inner-



halb des konstanten Bereiches ist auf elektrolytische Ionenleitung und auf elektrische Hysteresisarbeit im Wickel zurückzuführen. Die Verluste sind dabei keineswegs einheitlich über die Länge des Wickels verteilt, sondern an den Belagrändern erheblich größer als zwischen den Belägen. Bei Spannungen oberhalb des Knickes der Verlustzahlkurve treten an den Rändern der Beläge Glimmverluste im Innern der Faserstoffporen auf. Die Trennung der Verluste in solche im radial beanspruchten Dielektrikum und solche an den Kanten wurde von uns durch Auftrennen des Belages einer Versuchsdurchführung (Abb. 131) ausgeführt. Die Verlustzahl des Gesamtwickels lag bei  $\text{tg } \delta = 0,008$  und der Knick bei 15 kV. Leitete man beide Außenteile des Belages als THOMSONSche Schutzringe nach Erde ab, so blieb die Verlustzahl des Mittelteiles

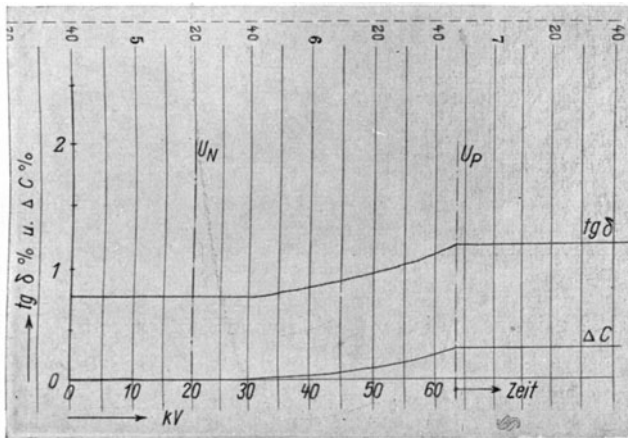


Abb. 130. Verlustfaktor  $\text{tg } \delta$  und Kapazitätsänderung  $\Delta C$  bei der Spannungsprobe einer Hartpapier-Durchführung R 20.

bis 50 kV konstant gleich 0,008, d. h. erst bei dieser Spannung setzte zwischen den Belägen das Glimmen ein. Die Verluste des Wickels mit Ausschluß der Kanten betragen bei 25 kV 45 mW, die der beiden Belagränder allein 235 mW. Die unverhältnismäßig hohen Verluste an den Belagrändern sind darauf zurückzuführen, daß die Axialkomponente der elektrischen Feldstärke an den Kanten die hier zulässige Beanspruchung erheblich überschreitet. Da bei Hartpapierwickeln und -rohren die axiale Festigkeit nur 10 bis höchstens 20% der radialen Festigkeit erreicht, so sind die hohen Kantenverluste verständlich. Abhilfe ist leicht durch Freilegen der Kanten und Einbetten in ein homogenes Dielektrikum, wie Öl oder Masse, zu erreichen. Im rechten Teil der Abb. 131 ist dies ausgeführt. Die Verluste im ganzen Wickel ohne die Kanten betragen wieder bei 25 kV wie im linken Teil der Abbildung 45 mW, die

Verluste an den Belagrändern dagegen nur noch 55 mW, weil kein Glimmen in Luft mehr auftreten kann.

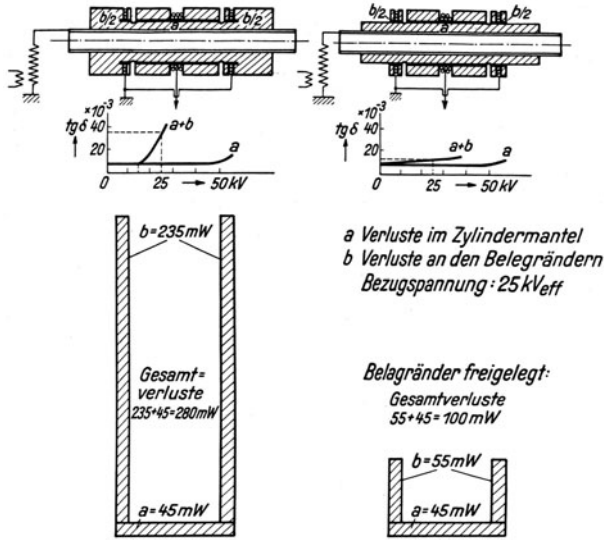


Abb. 131. Kondensatordurchführung unter Öl, Trennung der dielektrischen Verluste.

Abb. 132 zeigt nach diesen Gesichtspunkten hergestellte Hartpapier durchführungen eines 200 kV-Freiluftölschalters mit keramischen Überwürfen, die durch diese Maßnahmen zugleich stoßfest geworden sind. Bei der Berechnung dieser 200 kV-Durchführungen war darauf geachtet worden, daß das Dielektrikum nicht nur durch die dielektrischen Verluste geheizt wird, sondern auch durch die Kupferverluste, welche in dem voll mit Strom belasteten Innenleiter auftreten. Die hierdurch freiwerdenden Wärmemengen lagen jedoch beträchtlich unter den durch Wärmeleitung nach außen abführbaren. Die Gefahr eines Durchschlages durch Wärmestauung bestand deshalb nicht.

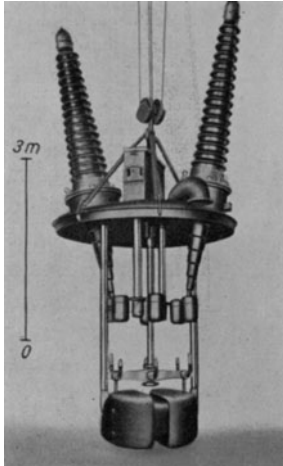


Abb. 132. Dreikessel-Freiluft-Ölschalter 200 kV, 600 A. Deckel mit Durchführungen und Strombahn.

Abb. 133 zeigt den Einfluß der Erwärmung von Durchführungen für 60 kV Nennspannung auf ihre Verlustzahl. Man erkennt, daß das schwache Anwachsen der

Verlustzahl nicht ein Vorzug der Durchführung aus Schellackpapier ist, sondern daß sich das gleiche günstige Verhalten unter Beach-

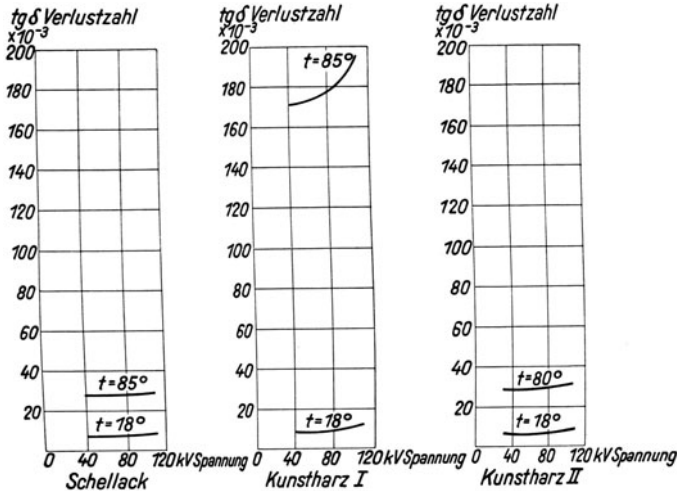


Abb. 133. Hartpapier-Durchführungen. Temperaturabhängigkeit der Verlustzahl.

tung gewisser Vorsichtsmaßregeln bei der Herstellung auch bei Kunstharzbindung erreichen läßt (s. die Schaulinien Kunstharz II, rechts

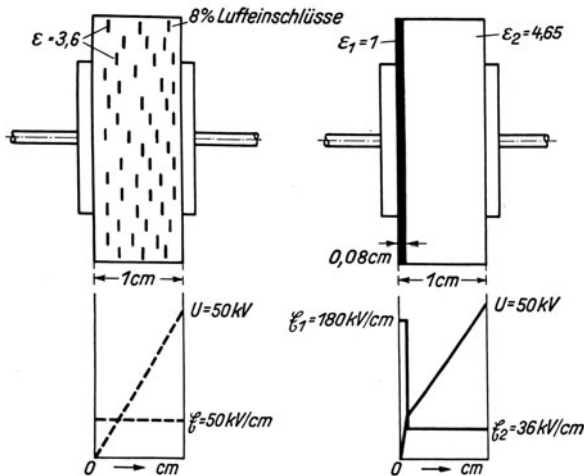


Abb. 134. Beanspruchung der Luft in porigen Isolierstoffen.

in Abb. 133). Würde man Durchführungen für 200 kV mit der Kunstharzbindung verwenden, deren Schaulinien in der Mitte der Abbildung dargestellt sind (Kunstharz I), so läge allerdings die Gefahr des Wärme-

durchschlages nahe. Baustoffeigenschaften ähnlicher Art mögen zu den diesbezüglichen Überlegungen von DREYFUSS Anlaß gegeben haben<sup>1</sup>.

Die in Abb. 131 dargestellten Versuchsergebnisse an den Durchführungen mit Schellackbindung gewähren einen interessanten Einblick in das Verhalten der in engen Poren des Isolierstoffes eingeschlossenen Luft (s. Abb. 134). Wir machen zunächst die Annahme, daß der aus Innenleiter und Belag gebildete Zylinderkondensator bei einer Dicke der dazwischen liegenden Hartpapierschicht von 1 cm einem solchen mit planparallelen Elektroden von 1 cm Abstand angenähert gleichzusetzen ist. Die Dielektrizitätskonstante des Isoliermittels ist  $\epsilon = 3,6$ . Ferner nehmen wir an, daß die in dem Dielektrikum fein verteilten Poren 8%

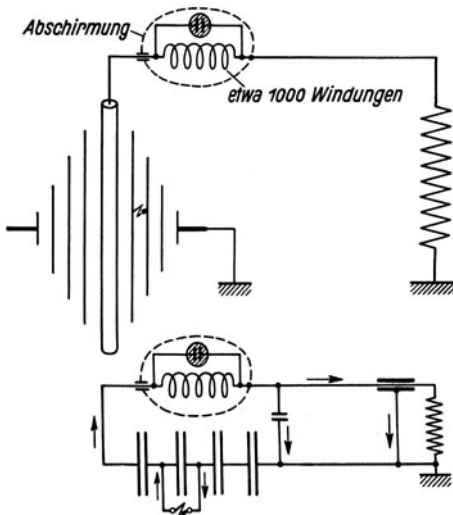


Abb. 135. Kondensator-Durchführung. Prüfung mit Glimmlampe.

der Dicke der gesamten Isolierschicht ausmachen. Denkt man nun die Poren alle zu einer gemeinsamen Luftschicht von 0,08 cm Dicke zusammengeschlossen und das übrige Dielektrikum um das gleiche Maß geschrumpft, so stellt man fest, daß bei einer Spannung von 50 kV zwischen den Elektroden des Kondensators, wobei in Abb. 131 das erste Glimmen in den Poren einsetzte, 180 kV<sub>eff</sub>/cm auf die Luftschicht mit  $\epsilon_1 = 1$  und nur 36 kV<sub>eff</sub>/cm auf das porenfrei gedachte Dielektrikum mit  $\epsilon_2 = 4,65$  entfallen. Die in der Größenordnung der freien Weg-

länge in Luft von Atmosphärendruck liegenden Querabmessungen der Poren erlauben es also, die Luft etwa 8—9 mal höher zu beanspruchen als Luft in dickeren Schichten, deren Durchbruch schon bei 21 kV<sub>eff</sub>/cm erfolgt. Bei Beanspruchung des Dielektrikums in Schichtrichtung ist eine ähnlich günstige Wirkung der Poren des Zellstoffes, die eine Längenabmessung von einem bis zu drei Millimetern erreichen können, nicht zu erwarten, vielmehr wird hier die Luft etwa die gleiche Festigkeit aufweisen wie im Freien. Diese Überlegungen tragen dazu bei, die geringe Festigkeit geschichteter Faserstoffe in Schichtrichtung zu erklären. Sie gelten nur, soweit die Poren nicht von Harz erfüllt sind. Das trockene Papier und die in seinen Poren enthaltene Luft sind verlustarme Träger der elektrischen Beanspruchung.

<sup>1</sup> Bull. Schweiz. elektrotechn. Ver. Bd. 15 (1924) S. 321.

Die Verlustwinkelmessung gibt neben der üblichen Spannungsprüfung mit 50 Hz einen Anhalt über die Tauglichkeit der Durchführungen. Jedoch ist es möglich, daß im Laufe später folgender Fabrikprüfungen unbemerkt Teildurchschläge erfolgen, die sich erst im Betrieb zu einem Vlldurchbruch auswachsen. Um derartige Teildurchschläge rechtzeitig erkennen und die davon befallenen Prüflinge sofort ausmerzen zu können, schalten wir bei jeder Prüfung in die Leitung vom Prüftransformator zum Prüfling eine kleine Drosselspule mit etwa 1000 Windungen mit parallel dazu geschalteter, statisch abgeschirmter Glimmlampe für 220 V (Abb. 135). Bei Teildurchschlägen zwischen den Belägen würden durch den Funken Schwingungskreise mit höheren Eigenfrequenzen angestoßen, die erhöhte Spannungen an der Drossel und Aufleuchten der Glimmlampe bewirken. Der Rückschluß des Schwingungskreises erfolgt über die Kapazität der Zuleitung und der Durchführung des Transformators gegen Erde. Auch zum Aufdecken von unerwünschten Gleitladungen hat sich diese kleine Anzeigevorrichtung<sup>1</sup> bestens bewährt.

### Das Pressen von Platten.

Wickel und Rohre erfahren auf der Wickelmaschine nur eine Bindung der Faserstoffschichten, jedoch noch keine Härtung des Harzes. Sie müssen hierzu auf ihren Dornen in den Härteofen gebracht und dort so lange belassen werden, bis die Härtung beendet ist. Jedenfalls bleiben sie unter dem Einfluß der Zugspannung, mit der das Papier aufgewickelt wurde, fest und formbeständig.

Anders liegen die Verhältnisse beim Pressen von Platten. Auf sie müssen Druck und Wärme so lange einwirken, bis das Harz aus dem A-Zustand vollkommen in den C-Zustand übergegangen ist. Die Platten müssen dann unter vollem Preßdruck in der Presse künstlich abgekühlt werden, ehe sie herausgenommen werden dürfen. Andernfalls würden die durch das Backen entstandenen heißen Dämpfe und Gase die einzelnen Schichten auseinandertreiben und die Platten blasig machen.

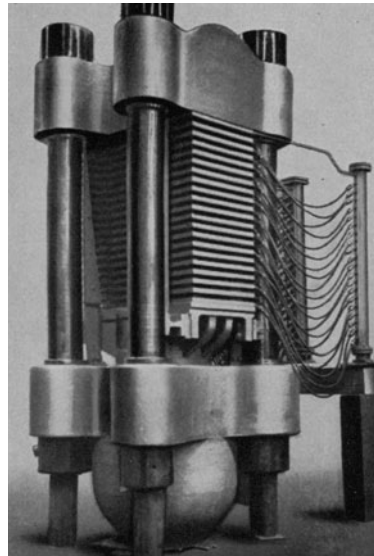


Abb. 136. Hydraulische Plattenpresse mit 20 Fächern.

<sup>1</sup> 1927 vom Verfasser angegeben.

Abb. 136 zeigt eine Heizplatten- oder Etagenpresse der Firma Becker & van Hüllen in Krefeld, mit der eine größere Anzahl von Platten gleichzeitig hergestellt wird. Die Zwischenplatten sind mit Kanälen versehen, um sie gleichmäßig erwärmen zu können. Nach Beendigung der Wärmebehandlung werden die Platten durch Einleiten von Kühlwasser durch die Kanäle künstlich abgekühlt, um die Herstellungszeit abzukürzen. Die erforderliche Zahl zugeschnittener lackierter Papierblätter oder Gewebekbahnen wird jeweils zwischen Blechen zu mehreren Sätzen übereinander geschichtet. Die Bleche ergeben je nach ihrer Oberflächenbeschaffenheit glatte bis spiegelblanke Isolierplatten. Dicke,

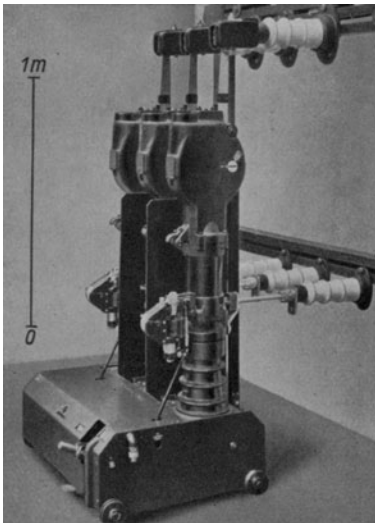


Abb. 137. Expansionsschalter Reihe 20, 600 A, 200 MVA.

Zerreißfestigkeit und Saugfähigkeit des verwendeten Papierses und der Lackauftrag hängen von dem Verwendungszweck und den physikalischen Anforderungen ab, die an die fertige Platte gestellt werden. Auch hier gilt, wie früher bemerkt, daß hoher Harzgehalt zwar die Feuchtigkeitsempfindlichkeit verringert, meist aber die Güte der elektrischen Eigenschaften herabsetzt. Billigere Platten werden aus wenigen Schichten dickeren Papierses hergestellt, während hochwertigere Erzeugnisse aus vielen Lagen dünnen Papierses gefertigt werden. Für die Dauer der Härtung ist in erster Linie die Zeit maßgebend, welche die Wärme zum Durchgang durch die Isolierstoffschicht braucht. Beim Pressen

dickerer Platten wurde von uns mittels eingebetteter Thermoelemente gelegentlich festgestellt, daß im Innern der Platte höhere Temperaturen als in der Nähe der Heizplatten auftreten. Dies deutet auf exothermisch verlaufende chemische Vorgänge bei der Kondensation und Polymerisation des Harzes hin.

Das Anwendungsgebiet der Platten ist mannigfaltig. Abb. 137 zeigt Hartpapierplatten als Trennwände zwischen den unter Spannung stehenden Leitern eines Expansionsschalters für 20 kV und 200 MVA. Durch das Einfügen isolierender Trennwände lassen sich die Abstände zwischen den unter Spannung stehenden Leitern erheblich verringern und damit der Platzbedarf des Gerätes verkleinern. Derartige Platten dürfen sich aber in warmer oder feuchter Luft nicht werfen und auch nicht wind-

schief werden. Hartpapierplatten werden ferner zum Absteifen von Wicklungen elektrischer Maschinen in Luft und in Transformatoren unter Öl gebraucht. Abb. 138 veranschaulicht die Anwendung bearbeiteter Hartgewebepplatten zur Aufnahme der Kräfte, die auf die Wickelköpfe eines Turbogenerators im Falle eines Kurzschlusses ausgeübt werden. Die Platten aus Hartgewebe sind wesentlich fester und unempfindlicher gegen Feuchtigkeit als die aus Hartpapier.

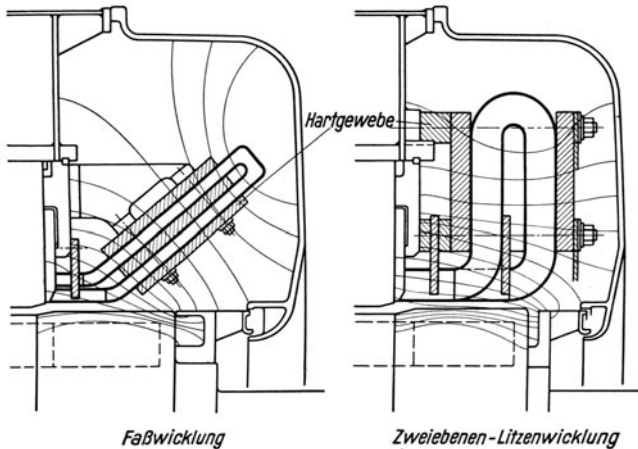


Abb. 138. Turbogenerator 11 000 kVA, 5250 V, 3000 U/min. Ständerwicklung.

### Das Pressen von Hartpapierleisten.

Auf der Plattenpresse können auch flachgepreßte Rohre hergestellt werden, die gern als Zugstangen für Leistungsschalter und Trennschalter gewählt werden, weil sie durch das Pressen fester als gewickelte Rohre werden und in einer Richtung kleinere Abmessungen als diese erhalten. Solche Flachleisten werden vor dem Pressen auf der Wickelmaschine mit kalten Walzen aufgewickelt.

### Das Pressen und Härten von Formstücken.

Konstruktionsteile aus gepreßten, geschichteten Isolierstoffen nennt man nach der Festsetzung des Verbandes Deutscher Elektrotechniker „Formstücke“. Ihre Formgebung erfolgt, ähnlich wie bei den Platten, durch einen Preßvorgang bei gleichzeitiger Wärmebehandlung in entsprechend ausgebildeten Stahlformen. Wesentliche nachträgliche Bearbeitung der Formstücke durch Drehen, Bohren oder Fräsen ist nicht erforderlich. Die Schichten des Isolierstoffes werden zweckmäßig senkrecht zur Richtung der elektrischen Beanspruchung angeordnet. Sie verleihen dem Formstück neben guten mechanischen auch sehr gute

elektrische Eigenschaften, an denen es den bekannten Kunstharzpreßmassen bis jetzt noch fehlt. Die Preßformen sind wie bei der Plattenpresse mit Kanälen für das Heiz- und Kühlmittel versehen. Die Heizung kann durch Dampf, Heizflüssigkeit oder elektrische Widerstandskörper erfolgen.

Das Füllen der Preßform mit vorgestanzten Papier- bzw. Gewebescheiben und aufgewickelten getränkten Bändern erfordert Geschick und Erfahrung hinsichtlich genauer Dosierung. Beim Pressen erfährt der Isolierstoff eine durchgreifende Verformung seiner Fasern, die jedoch nirgends zu Zerstörungen des Gefüges führen darf. Unsachgemäß hergestellte Formstücke erkennt man oft an Harznestern, die auf unvollkommene Ausfüllung der Form oder Zerreißen der Faserstoffbahn hindeuten. Abb. 139 zeigt einen Querschnitt durch ein aus Hartgewebe hergestelltes Formstück, das beim Aufschieben mit farbigen Gewebestreifen

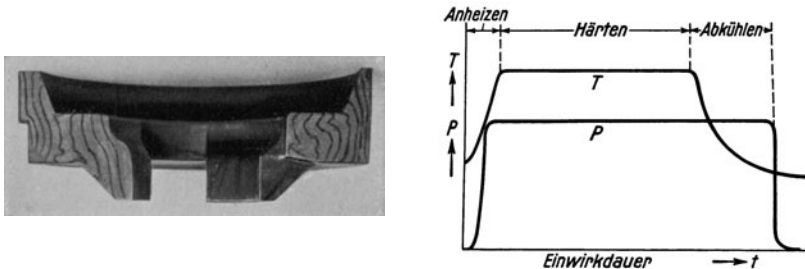


Abb. 139. Pressen und Härten von Formstücken.

durchschossen wurde, um die Verformung der einzelnen Fasern durch den Preßvorgang kenntlich zu machen. Die gleiche Abbildung gibt außerdem einen Überblick über den Verlauf der Wärme- und Druckbehandlung während eines Preßvorganges. Zunächst wird die Form erwärmt, um das Harz zu verflüssigen, so daß es die Fasern gegeneinander wie ein Schmiermittel umschließt und Verformungen der Schichten ermöglicht, die bei trockenen Papier- oder Gewebestoffen zum Zerreißen der Fasern führen würden. Zugleich entweichen zu Beginn der Erhitzung das bei dem molekularen Umwandlungsvorgang des Harzes abgespaltene Kondensationswasser und Reste des Lösungsmittels, deren Zurückbleiben in den Poren des Faserstoffes die elektrischen Eigenschaften des Formstückes mindern würde. Man fährt deshalb die Presse erst nach dem Erreichen einer bestimmten Temperatur zusammen. Vorzeitiges Schließen der Presse gibt elektrisch schlechte Körper, zu spätes Schließen kann zu mechanischer Zerstörung bereits in den C-Zustand übergegangener Harzanteile führen. Nach Einhalten der erforderlichen Härtezeit wird Kühlwasser durch die Kanäle der Preßform geschickt, die erst im erkalteten Zustand geöffnet werden darf. Andernfalls würde das



Formstück, wie bereits bei der Plattenherstellung geschildert, durch die entstehenden Dämpfe auseinandergerissen oder zerspalten werden. Die Härte- und Abkühlzeiten müssen für jedes Formstück verschiedener Abmessung durch Versuche ermittelt und sorgfältig eingehalten werden. Ungenügend gehärtete Körper weisen geringe Durchschlagsfestigkeiten und hohe Verlustzahlen auf. Eine über das Maß des Notwendigen hinausgehende Härtezeit erfordert andererseits unnötig hohe Kosten durch Belegen der Presse. Eine Wärmenachbehandlung ungenügend ausgehärteter Formstücke darf höchstens bei Temperaturen von  $90 \dots 100^\circ$

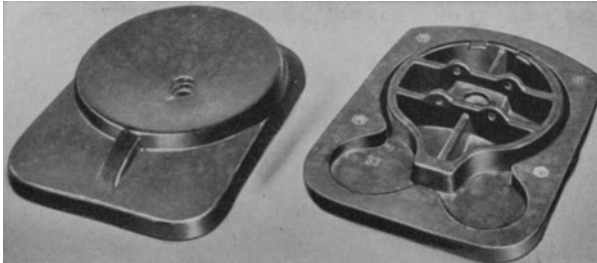
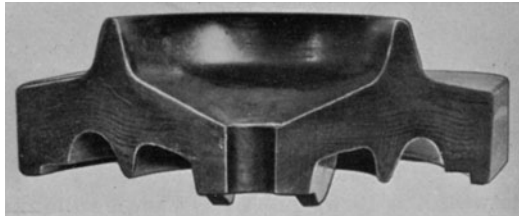


Abb. 140. Kammerdeckel aus Hartpapier und Hartgewebe für Expansions-schalter.

erfolgen, um zu verhindern, daß das Gefüge des Körpers durch inneren Dampfdruck zerstört wird. Abb. 140 zeigt einen Querschnitt durch den Hartpapierdeckel eines Expansions Schalters. In der gleichen Abbildung ist ein ähnlicher aus Hartgewebeschnitzeln hergestellter Deckel dargestellt, bei dem die notwendige Festigkeit unter Anwendung von Versteifungsrippen wie bei Stahlformguß erreicht wurde. Abb. 141 läßt die Vereinigung von Hartgewebe- mit Metallteilen erkennen, die für die Kammern von Expansionschaltern verwendet werden.

Die zuletzt besprochenen Beispiele sind dem Anwendungsgebiet der öllosen Hochleistungsschalter entnommen. Die Entwicklung dieser Geräte verlangte von der Isolierstofftechnik Werkstoffe, die dem dauernden unmittelbaren Einfluß von Wasser ausgesetzt werden können, ohne ihr

Isoliervermögen einzubüßen, größte mechanische Zerreiß- und Schlagbiegefestigkeit aufweisen und dazu von den hohen Temperaturen des elektrischen Lichtbogens nicht angegriffen werden. Organische Isolierstoffe, die allen diesen Ansprüchen genügten, standen zu Beginn dieser

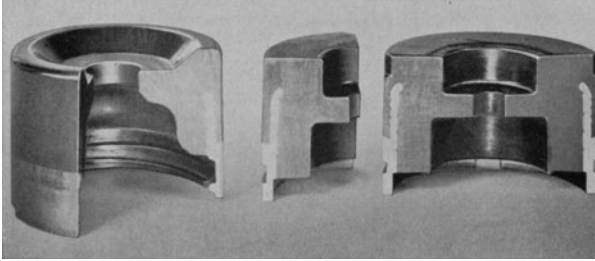


Abb. 141. Vereinigung von Metallteilen und Formkörpern.

Entwicklung (etwa 1929, 1930) noch nicht zur Verfügung. Die Hartpapierhersteller lösten die ihnen gestellte Aufgabe in vollkommener Weise im Laufe einer etwa zweijährigen Arbeit und bewiesen damit das Anpassungsvermögen dieses jungen Zweiges der Isolierstofftechnik.

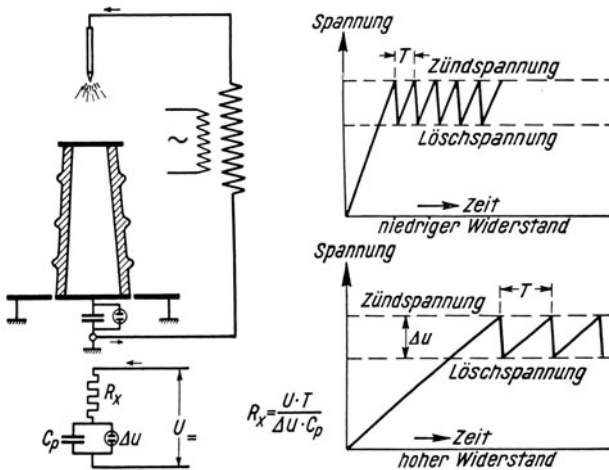


Abb. 142. Blinkschaltung mit Glühlampe zum Nachprüfen von Hochspannungsisolatoren.

Die Prüfung der Isolierkörper erforderte im Laufe dieser Entwicklung ebenfalls eine neue Einstellung. Es galt, elektrisch unzureichende Hartpapierkörper durch eine Hochspannungsprüfung zu erkennen, ohne sie hierdurch zu beschädigen, und sie dann durch zweckdienliche Nachbehandlung brauchbar zu machen. Abb. 142 zeigt die getroffene An-

ordnung. Mit dem Prüfling in Reihe liegt gegen Erde ein Kondensator von einigen Zehntel- $\mu$ F und parallel zu diesem eine Glimmlampe für 220 V. Zwischen dem Hochspannungspol des Prüftransformators und dem Prüfling ist eine Nadel/Plattenfunkenstrecke angeordnet, die bei Auftreten von Büschelentladungen aus der Spitze als Gleichrichter wirkt. Je nach der Leitfähigkeit des Isolierstoffes erfolgt die Aufladung des Kondensators und seine Entladung durch die parallel liegende Glimmlampe verschieden schnell. Der schlechte Prüfling mit kleinem Durchgangswiderstand zeigt einen nur kleinen Spannungsabfall zwischen Kappe und Flansch und erfährt keine Erwärmung, während der einwandfreie, ohne Schaden zu nehmen, eine wesentlich höhere Spannung trägt. In ähnlicher Weise können Hartpapierstützer und -durchführungen mit hochgespanntem Gleichstrom mit Kondensator und Glimmlampe nachgeprüft werden, ohne daß sie von ihrem Einbauort entfernt werden müßten.

Der Verband Deutscher Elektrotechniker hat auch für die Prüfung von Formstücken Leitsätze, VDE 0326, aufgestellt, die sich den Vorschriften über die Prüfung von Hartpapierrohren und -platten sinngemäß anschließen.

### **Oberflächenschutz.**

a) **Keramische Überwürfe.** Aus geschichtetem Faserstoff aufgebaute Isolatoren, wie Hochspannungsdurchführungen, dürfen den Einflüssen der Witterung nicht ungeschützt ausgesetzt werden. Man rüstet deshalb Kondensatordurchführungen für Außenwände, Freiluftgeräte, z. T. auch für Transformatoren und Meßwandler, mit keramischen Schutzhüllen aus, die den Wickel nach außen luftdicht abschließen. Der Hohlraum zwischen Wickel und Überwurf wird möglichst klein bemessen und mit einer auch bei tiefen Temperaturen noch plastischen Masse ausgegossen. Zu harte Vergußmassen neigen in der Kälte zu Sprüngen, in denen Glimmen auftritt, das den Keim zu späterer Zerstörung durch Innenüberschlag bildet. Derartig geschützte Durchführungen sind in der Abb. 132 eines Freiluftölschalters für 200 kV zu erkennen. Die Überwürfe können auch mehrteilig ausgeführt werden, ihre Einzelteile müssen dann auf die Dauer wasserdicht miteinander verbunden sein. Bei Lagerung, Versand und Einbau ist peinlichst darauf zu achten, daß die Luftblase in dem für die Ausdehnung der Masse in der Wärme vorgesehenen Raum sich immer am höchsten Teil der Durchführung in einem feldfreien Raum befindet, um ein Wandern der Luftblase und störende Glimmerscheinungen auszuschließen.

b) **Oberflächenschutzlacke.** Hochspannungsdurchführungen und Stützisolatoren aus Hartpapier für Innenräume müssen ebenfalls einen gewissen Oberflächenschutz erhalten. Bei ungeschützter Oberfläche

würden sie in kurzer Zeit Feuchtigkeit aus der umgebenden Luft aufnehmen und ihr Isoliervermögen einbüßen. Die Erfahrung hat gezeigt, daß man diese Isolatoren in unserem Klima in ungeheizten Stationen verwenden kann, wenn die Isolatorenoberfläche mit mehreren Lagen von Schutzlacken versehen ist, die im Ofen eingebrannt sind. Während des Winters mit höherer Luftfeuchtigkeit erfolgt dann nur eine geringe unschädliche Wasseraufnahme, die während der trockenen Sommermonate wieder an die Außenluft abgegeben wird. Dauernd unter Spannung stehende Isolatoren nehmen erfahrungsgemäß überhaupt keine Feuchtigkeit auf. Kein Lack ist undurchlässig für Feuchtigkeit. Ofentrocknende

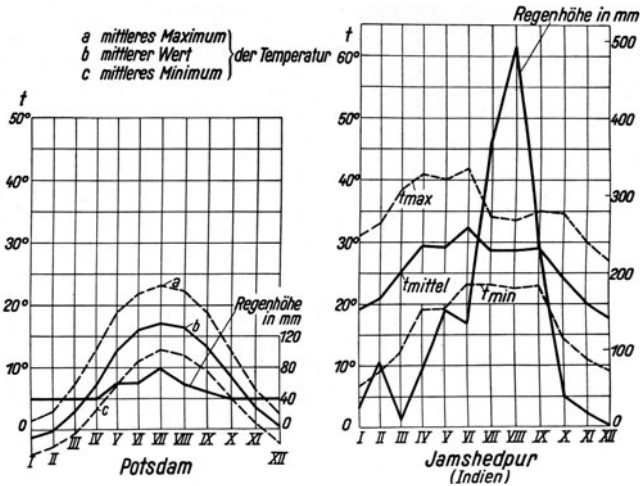


Abb. 143. Temperatur und Regenhöhe in Potsdam und in Jamshedpur.

Lacke sind im allgemeinen dichter und dauerhafter als lufttrocknende Lacke, bei denen die Trocknung weniger auf Oxydation und Polymerisation beruht, als auf Verdampfung des Lösungsmittels. Schellack und Kunstharz sind, allein verwendet, zu Oberflächenlacken ungeeignet. Von den zahlreichen im Handel befindlichen Lacken erfüllen nur einige wenige die Anforderungen, die man an Wasserdurchlässigkeit, Härte, Quellbarkeit, Oberflächenwiderstand und Lebensdauer stellen muß. Hartpapierisolatoren haben bei einiger Pflege eine lange Lebensdauer. Sie sollten in regelmäßigen Zeitabständen von Staub und Schmutz gesäubert und alle Jahre einmal mit einem Spezialfirnis abgerieben werden, um die im Laufe der Zeit unvermeidlichen Schrumpfrisse im gealterten Lacküberzug zu schließen und den Lack geschmeidig zu erhalten. Eine gesamte Erneuerung der Lackierung wurde bei den bestehenden Anlagen bisher auf Grund der Betriebserfahrungen nicht für notwendig erachtet.

### Tropenfeste Isolierstoffe.

In der Hochspannungstechnik gab es bisher keine organischen Isolierstoffe für elektrisch hochbeanspruchte Teile, die ohne Gefahr der Einwirkung des Tropenklimas standhalten konnten. Der Begriff „tropenfest“ ist vielfach unrichtig angewendet worden, um Hartpapiere zu kennzeichnen, die nur etwa die Hälfte der Wasseraufnahme der üblichen Hartpapiersorten zeigten. Im folgenden sollen nur solche Isolierstoffe als „tropenfest“ angesprochen werden, die sich ungeschützt für dauernde Verwendung in den Tropen eignen. In Abb. 143 ist die Verteilung der Temperatur und der Niederschlagsmengen in den einzelnen Monaten des Jahres für einen Ort unseres gemäßigten Klimas (Potsdam) und für

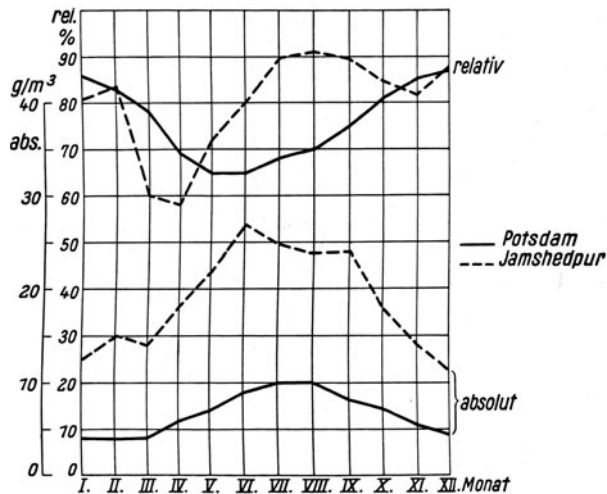


Abb. 144. Relative und absolute Luftfeuchtigkeit in Potsdam und Jamshedpur.

einen in der indischen Provinz Bengalen gelegenen Ort (Jamshedpur) mit Tropenklima wiedergegeben. Obgleich an beiden Orten die Hauptregenmengen in den Sommermonaten fallen, ist die mittlere relative Luftfeuchtigkeit in unseren Breiten im Sommer erheblich geringer als im Winter. In den Tropen fällt im Sommer ein Vielfaches der Regenmengen der gemäßigten Zonen, und es herrscht zur Zeit des Monsoon die höchste Luftfeuchtigkeit. In Abb. 144 ist neben dem relativen Feuchtigkeitsgehalt der Luft auch der absolute Feuchtigkeitsgehalt in Gramm je Kubikmeter für Potsdam und Jamshedpur angegeben. Die Gefährdung, welche die Isolierstoffe im Tropenklima erfahren, besteht darin, daß sie während der Sommermonate nicht nur keine Austrocknung erfahren, sondern im Gegenteil mit großen Wasserdampfmengen bei hoher relativer Feuchtigkeit in Berührung kommen.

Leider zeigten Formstücke und flachgepreßte Rohre aus Hartgeweben mit hohem Harzgehalt, die bisher allein hohen Luftfechtigkeiten zu widerstehen vermochten, für Hochspannungszwecke zu hohe elektrische Verluste. In den letzten Jahren ist es nun gelungen, durch geeignete Auswahl der Ausgangsstoffe und sorgfältige Überwachung des Herstellungsvorganges Hartgewebestoffe herzustellen, die auch unter dem dauernden Einfluß des Tropenklimas ein ausreichendes Isoliervermögen bewahren. In Abb. 145 sind Versuchsergebnisse an drei flachgepreßten Leisten aus Faserstoffen mit Kunstharzbindung verschiedener Herstellung wiedergegeben. Die Versuchskörper wurden in einem künstlich auf einer Temperatur von  $55^{\circ}\text{C}$  und  $95 \dots 100\%$  relativer Luftfeuchtigkeit

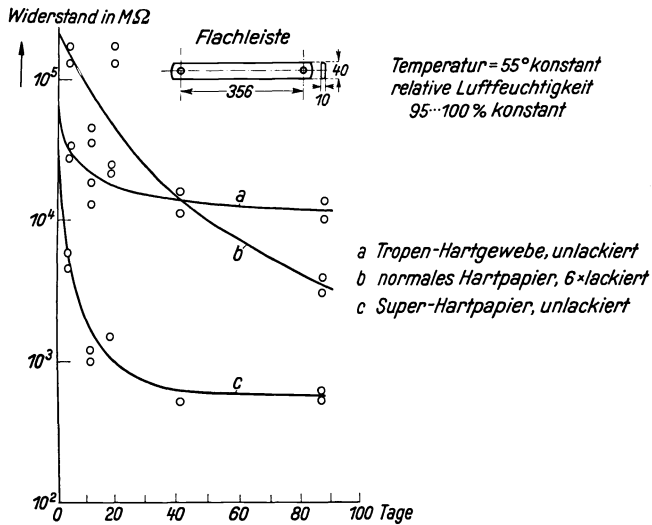


Abb. 145. Tropenprüfung von Hartpapier und Hartgewebe.

gehaltenen Raum aufbewahrt. Sie wurden vor jeder Messung in einem geschlossenen Gefäß mit einer Wasserschicht am Boden auf etwa  $20^{\circ}$  abgekühlt und dann auf ihren Oberflächen- und Durchgangswiderstand zwischen den Befestigungslöchern untersucht. Die Widerstandsskala der Abb. 145 ist logarithmisch aufgetragen. Die Flachleiste „b“ aus gewöhnlichem, aber 6 mal lackiertem Hartpapierrohr gepreßt, hat anfänglich den höchsten Widerstand, der aber im Laufe von drei Monaten erheblich absinkt. Sie ist in unserem Klima brauchbar, für die Tropen hingegen völlig unzureichend. Die Flachleiste „c“ aus Super-Hartpapier weist zwar anfänglich einen geringeren Widerstand als die unter „b“ genannte auf, zeigt jedoch nach drei Monaten schon einen Beharrungszustand. Die Spannungsprüfung ergab hierbei keine merkliche Erwärmung. Die aus dem neuen Tropenhartgewebe hergestellte Flachleiste „a“ zeigt unter

gleicher Beanspruchung einen Widerstand, der um mehr als eine Größenordnung höher liegt als bei dem Super-Hartpapier „c“ und sich einem gleichbleibenden Endwert nähert.

Diese tropenfesten Isolierstoffe werden ohne zusätzliche Oberflächenlackierung verwendet, da die Wasseraufnahme des Lacküberzuges größer sein würde, als die des Gewebestückes selbst. Abb. 146 zeigt einen

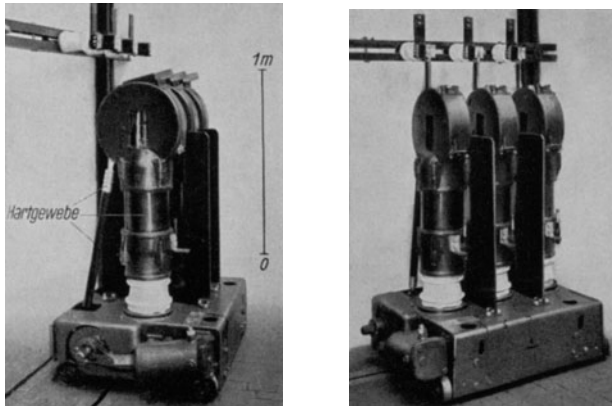


Abb. 146. Expansionsschalter 6 kV, 600 A, 600 MVA. Ausschaltstrom 60 000 A, Einschaltstrom 150 000 A mit Druckluftantrieb.

für Verwendung in den Tropen bestimmten ölfreien Hochleistungsschalter, dessen Schaltgefäße und Zugstangen aus tropenfestem Hartgewebe hergestellt sind.

Die in den letzten Abschnitten angeführten Beispiele für die Anwendung organischer Isolierstoffe im Hochleistungsschalterbau zeigen, daß es nicht nur gelungen ist, den Isolierstoff den schnell gestiegenen Ansprüchen dieses Zweiges der Elektrotechnik in den letzten Jahren anzupassen, sondern daß er zu einem guten Teile die Grundlage einer neuen erfolgreichen Entwicklung bildet.

# Isolierstoffe in der Niederspannungstechnik.

Von H. BURMEISTER, Berlin.

## I. Grundstoffe der Isoliertechnik.

In den vorhergehenden Vorträgen ist ein Überblick über die Eigenschaften, sowie die Prüfung und über einige Anwendungsgebiete der Grundstoffe gegeben worden. Die in der Niederspannungstechnik verwendeten Rohstoffe sind hierbei teilweise schon berührt, es seien jedoch

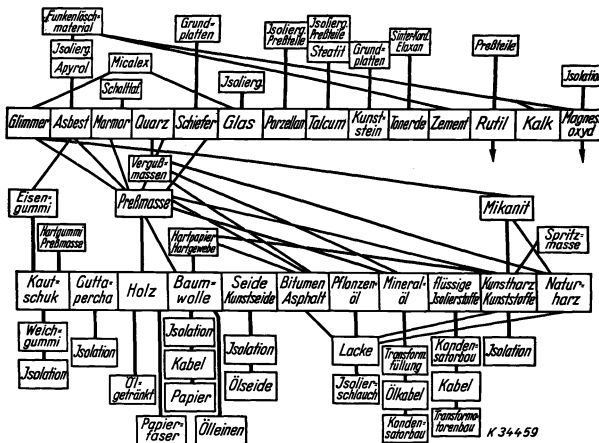


Abb. 147. Anorganische und organische Grundstoffe und ihre Anwendung.

besonders wichtige Eigenschaften nochmals unterstrichen und Anhaltspunkte mitgeteilt, wie das Verhalten dieser Isolierstoffe im Gebiet der Niederspannung technisch ausgenutzt werden kann.

Abb. 147 enthält eine Aufstellung aller der Stoffe, die für die Niederspannungstechnik wertvoll sind. Die Hauptanwendungsgebiete sind gleichfalls angegeben, und durch Verbindungslinien ist die Vereinigung der einzelnen Stoffe zum Endprodukt gekennzeichnet, das den Isolierstoff darstellt.

Die Grundstoffe zerfallen in solche anorganischer und organischer Natur. Der Glimmer, der bekanntlich in Deutschland nicht in nennenswertem Maße gefunden wird, ist einer der hochwertigsten Isolierstoffe,



die wir verwenden, und zur Zeit wegen seiner hohen Wärmesicherheit noch unersetzlich. Die Niederspannungstechnik verwendet Glimmer in Form der Mikanite und in Form von mancherlei Glimmerzubereitungen, auf die im Laufe des Vortrages noch einzugehen ist.

Ebenso wie Glimmer ist Asbest kein Heimstoff. Dieses Naturerzeugnis ist für die Isolationstechnik ebenfalls wegen seiner Wärmebeständigkeit, aber vor allem auch wegen seiner Faserstruktur wertvoll. In Form langfaseriger Asbeste verarbeiten wir das Material für die Drahtisolierung; in Form kurzer Asbestfasern für die Herstellung von Preßmassen, Funkenlöschmaterial und Vergußmassen. Für manche Zwecke, besonders für die Herstellung gewisser Preßmassen, sind auch deutsche Füllstoffe auf Basis von Silikaten und Schiefer geeignet.

Marmor, in erster Linie zur Herstellung von Schalttafeln und in gemahlenem Zustand für Preßmassen und Vergußmassen verwendet, entstammt dem deutschen Bergbau. Auch Schiefer, welcher in derselben Weise wie Marmor ein wertvolles Grundmaterial für den Schalttafel- und Grundplattenbau bildet, ist deutsches Bergbauerzeugnis.

An der Entwicklung der Glasfabrikate für die Verwendung als Isoliermaterial wird zur Zeit lebhaft gearbeitet, und es ist mit Sicherheit anzunehmen, daß uns in Kürze in Form von feinsten Glasseiden wertvolles Isolationsmaterial für hochwärmebelastete Isolierungen zur Verfügung steht.

Die nächsten Grundstoffe und die daraus hergestellten Massen, wie Porzellan, Steatit, Calit, sind bereits eingehend in dem vierten Vortrag (S. 121) besprochen worden; einzelne Anwendungsmöglichkeiten werden noch erörtert (S. 199, 205, 208).

Auch die Kunststeinfabrikation für die Elektrotechnik hat sich vielseitig entwickelt. Die Hauptstoffe hierfür, vor allen Dingen Schlacken und Gesteinsarten, werden in Deutschland in der mannigfaltigsten Weise gefördert und finden als Grundplatten und Schalttafeln usw. bereits ausgedehnte Verwendung.

Tonerde bildet das Ausgangsmaterial für den Sinterkorund und andere hochwärmeebeständige, gut formbare Isolierstoffe von hochwertigen Eigenschaften (vgl. S. 266). Rutil — wie bekannt, Titan-dioxyd — wird in der Keramik zu preßbaren hochwertigen Massen verarbeitet (vgl. S. 148). Kalk ist ein Ausgangsmaterial für viele Arten der unter dem Namen Funkenlöschmaterial zusammengefaßten Sonderfabrikate. Das Magnesiumoxyd als hochwärmeebeständiger Isolierstoff gibt der Technik die Möglichkeit, Heizdrähte und Heizelemente in einer gut formbaren Zubereitung zu gewinnen (vgl. S. 266).

Wenn wir uns die Reihe der organischen Grundstoffe für die Elektrotechnik ansehen, so wird klar, daß unter diesen Materialien für den deutschen Markt viele Einfuhrprodukte sind. Kautschuk,

Guttapercha, Baumwolle, Seide, Mineralöle, Naturharze und Pflanzenöle gehören hierher, auch Holz und Bitumen sind zu nennen.

Wir verwenden Kautschuk in der Drahtisolation, während die Industrie der gummihaltigen Preßmassen mehr und mehr der der synthetischen Kunstharze weicht. Die Kautschukeinfuhr zeigte in den Jahren 1928 bis 1937 eine steigende Kurve:

1928 . . . . .	rd. 51 000 t
1930 . . . . .	„ 55 000 t
1932 . . . . .	„ 50 000 t
1934 . . . . .	„ 72 000 t
1936 . . . . .	„ 82 000 t

Gleichzeitig waren auch die Kautschukpreise in ständigem Steigen begriffen, sie betragen:

1932 . . . . .	41,30 RM für 100 kg
1934 . . . . .	64,60 „ „ 100 kg
Mitte 1937 . . . . .	115,— „ „ 100 kg

Die Verwendungsfähigkeit von Kautschuk ist begrenzt durch seine Empfindlichkeit gegen Ozon, wie es sich z. B. in der Hochspannungstechnik an der Oberfläche von unter hohen Spannungen stehenden Kabeln bildet. Verwendungsmöglichkeiten bestehen im allgemeinen bei Spannungen bis zu 10 kV, unter besonderen Maßnahmen auch darüber.

Im Handel sind drei Hauptsorten: Para, smoked sheets und first latex crepe. Je nach den Erfordernissen werden Mischungen von 25 bis 60% Kautschuk mit Füllstoffen verwendet. Auch durch die Mitverwendung von Regeneratgummi gelingt es, unsere Gummivorräte auszunutzen. Regenerat unterstützt die Kautschukverarbeitung dadurch, daß es den Mischungen eine große Weichheit und Elastizität verleiht, sowie die dielektrischen Eigenschaften verbessert.

Guttapercha, das früher in der Kabelisolation eine große Rolle spielte, verschwindet mehr und mehr aus diesem Industriezweig.

Holz ist bekanntlich das Ausgangsmaterial für die Herstellung von Papieren. Die Holzverwertung, z. B. für Zellwolle und allgemeine Verbrauchspapiere, ist bereits weitgehend auf einheimische Hölzer abgestellt.

Die Baumwollisolation, die früher einen beachtlichen Teil der Baumwolleneinfuhr verbrauchte, wird heute mehr und mehr auf Kunstfasern in Form von Kunstseide, Papier, Zellwolle umgestellt. Ebenso liegt es mit der Seide. Auch auf diesem Gebiete erreichen wir mit der Kunstseidenisolation vielfach Befriedigendes.

Der Bedarf an Bitumen und Asphalten kann heute bereits in hohem Prozentsatz durch deutsche Erdölfabrikate gedeckt werden.

Außerordentlich schwierig für die Isolationstechnik erscheint die Beschaffung geeigneter Ausgleichstoffe für Pflanzenöle, z. B. Leinöl und Holzöl. Abgesehen von dem verstärkten Anbau von Ölpflanzen und dem

Ausbau der Trangewinnung bemüht sich die chemische Industrie, der Isolationstechnik durch Entwicklung synthetischer Kunststoffe vor allem auf dem Lackgebiet zu neuen Fortschritten zu verhelfen. Wir werden im Verlauf dieser Ausführungen noch darüber zu sprechen haben, wieweit dies gelungen ist. Auch im Bereich der Mineralölanwendung machen sich bereits die deutschen Erdölfabrikate bemerkbar, wenn auch vorläufig nicht zu erwarten ist, daß Kabelöle, Transformatorenöle usw. in größerem Umfang durch deutsche Heimstoffe ersetzt werden.

Der Bedarf an Kunstharzen und Kunststoffen überhaupt kann durch Heimstoffe fast völlig gedeckt werden. Es ist interessant zu verfolgen, mit welcher Beharrlichkeit und Ausdauer die ausländischen Wissenschaftler auf dem Kunststoffgebiet gleichfalls tätig sind, trotzdem im Auslande eine unmittelbare wirtschaftliche Notwendigkeit zur Schaffung von Heimstoffen nicht vorliegt. In erster Linie ist dies ein Zeichen dafür, daß die Stoffe, die die Natur uns bietet, den fortschreitenden Ansprüchen der Technik nicht mehr genügen, und ferner ist es ein Beweis dafür, daß unsere Bestrebungen, Heimstoffe zu schaffen, nicht nur auf Grund innerwirtschaftlicher Erwägungen geschehen, sondern auch durch die Notwendigkeit begründet sind, technischen Mehrforderungen nachzukommen.

### **Kunstharze.**

Die Welterzeugung an Kunstharzen betrug im Jahre 1934 etwa 70 000 t. Hieran war Deutschland mit ungefähr 22 500 t beteiligt. Die Kunstharze sind ursprünglich entstanden aus der Notwendigkeit, gewisse für die elektrotechnische Verwendung nicht befriedigende Eigenschaften der Naturharze zu ergänzen. Der Erfolg ist, daß heute in der Elektrotechnik die Kunstharze die Naturharze bei weitem überflügelt haben. Dieser Fortschritt ist der chemischen Industrie zu verdanken, die den synthetischen Aufbau der Kunstharze bis zu einer hohen Vollkommenheit vorangetrieben hat.

Deutschland bietet uns bekanntlich wenig Naturharze, und die Einfuhrziffern in diesem Werkstoff waren früher sehr hoch. Naturgemäß ist auch heute noch die Verwendung von Naturharzen, z. B. Schellack, Kopal, Dammar, besonders in der Lackindustrie sehr vielseitig, doch können wir wohl mit ziemlicher Bestimmtheit erwarten, daß die weitere Entwicklung der Chemie uns auch weiteren Ausbau der heimischen Harzgewinnung und damit auch die Lösung mancher Isolationsprobleme bringen wird.

Die als Ausgangsstoffe für die organischen Werkstoffe zur Zeit zur Verfügung stehenden Industrieprodukte faßt E. SAUTER in zwei großen Gruppen übersichtlich zusammen<sup>1</sup>:

---

<sup>1</sup> Z. VDI. Bd. 81 (1937) S. 17.

1. die Produkte der Kokereien, Schwelereien und der Erdölaufbereitungsindustrie: Steinkohlenteer, Ätylen, Propylen, Azetylen;

2. Erzeugnisse der Großhydrierung der Ammoniaksynthese (Harnstoff), der Methanolsynthese (Methylalkohol, Formaldehyd, Isobuthylen und Isobuthylalkohol); ferner Erzeugnisse der Stein- und Braunkohlenhydrierung (Benzin usw.).

Aus der Teerdestillation gewinnen wir Phenole und Kresole, aus dem Naphthalin Phthalsäureanhydrid, Maleinsäureanhydrid, aus der Cumaronfraktion Cumaron- und Indenharze. Aus dem Methanol gewinnen wir den Formaldehyd, aus dem Äthylen und Propylen Glykol und Glycerin, aus dem Azetylen das wertvolle Styrol, aus Benzol synthetisches Phenol und Anilin.

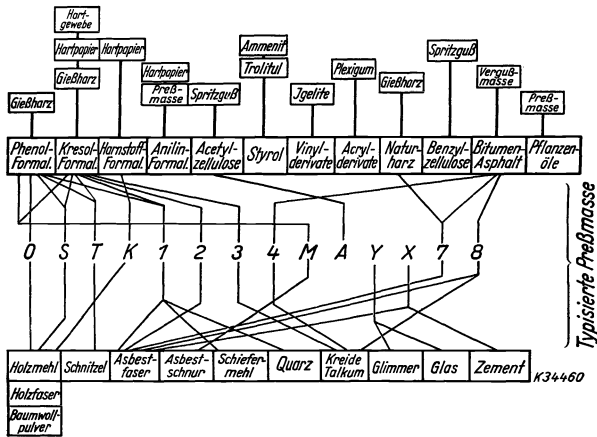


Abb. 148. Preßmassen, Spritzgußmassen, Gießharze.

In Abb. 148 sind die Kunstharze und Kunstmassen aufgeteilt nach ihren Ausgangsprodukten mit gleichzeitigem Hinweis auf die Gruppeneinteilung und die Verarbeitungsverfahren. Wir verwenden Kunstharze in folgender Weise:

1. als Preßmassen und Gießharze,
2. als Spritzgußmassen,
3. für Lackzwecke,
4. für Klebezwecke.

Für Preßmassen finden in erster Linie diejenigen Harze Verwendung, die härtende Eigenschaften haben, d. h. also, die durch Wärmebehandlung in eine höhere Kondensationsstufe überzuführen sind. Die Härtung kann sich vollziehen während des Preßvorganges — z. B. bei den Preßmassentypen O, S, T, K, 1 und M — oder aber durch nachträgliches Härten bei voraufgegangenem Kaltformprozeß bei den Typen 2, 3 und 4. Die

Formung der Typen 7 und 8, sowie A, ist lediglich eine Heißformung durch Ausnutzen der Schmelzfähigkeit von Harzen, Bitumen und Pechen.

Die Eigenschaften der typisierten Preßmassen sind genügend oft erörtert (vgl. S. 69 und die Tafel am Schlusse des Buches), sie sollen hier als bekannt vorausgesetzt werden. Etwas ausführlicher seien einige neue Produkte besprochen, z. B. das Anilinharz.

Dieses kommt zur Zeit als nichthärtendes Harz auf den deutschen Markt und wird im Wege des Preßverfahrens verarbeitet. Die Erkenntnis, daß Anilin mit Formaldehyd harzartige Produkte ergibt, ist bereits auf das Jahr 1896 zurückzuführen<sup>1</sup>. Im Jahre 1917 wurde in amerikanischen Patentanmeldungen darauf hingewiesen, daß Mischkondensate aus Phenol mit Anhydroformaldehyd oder Anilin und Formaldehyd gute isolierende Eigenschaften besitzen<sup>2</sup>. Dann wurde durch die deutsche Patentliteratur<sup>3</sup> bekannt, daß unter Verwendung von Anilin und Formaldehyd Harze mit guten isolierenden Eigenschaften für die Lackindustrie hergestellt werden können. Im heutigen Entwicklungsstand ist es bereits möglich, hochwertige Harze in großen Mengen fabrikmäßig herzustellen und zu Platten und Formstücken zu verarbeiten. Auch wertvolle Hartpapiere auf Anilinharzbasis sind bereits erhältlich. Die zur Zeit im Handel befindlichen Harze sind allerdings in den gewöhnlichen Lösungsmitteln nicht löslich und ähneln ungefähr den bisher als „thermoplastische Harze“ benannten Gruppen der Kunststoffe.

Die Eigenschaften solcher Harze bzw. Hartpapiere finden wir in einer kleinen Broschüre „Kondensation von Anilin mit Formaldehyd und deren Bedeutung für die Herstellung plastischer Massen“<sup>4</sup>:

#### I. Verpreßte thermoplastische Anilinharze:

Zugfestigkeit . . . . .	bis 700 kg/cm <sup>2</sup>	
Biegefestigkeit . . . . .	1200 kg/cm <sup>2</sup>	
Schlagbiegefestigkeit . . . . .	15 . . . 20 emkg/cm <sup>2</sup>	
Wärmebeständigkeit nach MARTENS . . . . .	105° C	
Elastizitätsmodul . . . . .	20000 . . . 30000 kg/cm <sup>2</sup>	
Spezifisches Gewicht . . . . .	1,20 . . . 1,25	
Oberflächenwiderstand (nach Vorbehandlung A & B, lt. VDE-Vorschrift) . . . . .	10 <sup>6</sup> Megohm	
Dielektrizitätskonstante . . . . .	3 . . . 4	
Dielektrische Verluste	bei 25° C	bei 90° C
bei 50 Hz, tg δ . . . . .	0,01 . . . 0,02	0,02 . . . 0,12
„ Radiofrequenz, tg δ . . . . .	0,0015 . . . 0,002	0,002 . . . 0,01
Durchschlagsfestigkeit (Minutenwert in Öl bei 90° C, Plattendicke 6,9 mm) . . . . .	10 kV/mm	
Glühkonusprobe nach den SEV-Normen, Belastung. . . . .	750 g bei 200—260° C	

<sup>1</sup> RACKOW, P. N.: Chem.-Ztg. 1896, S. 306.    <sup>2</sup> USA. Pat. 1216265 von 1913.

<sup>3</sup> DRP. 452009 u. 453276 von 1925.    <sup>4</sup> Schweiz. Revue 1935.

Wasseraufnahme	bei 20° C	bei 95° C
nach 1 Tag . . . . .	0,05%	—
„ 7 Tagen . . . . .	0,14%	—
„ 6 Stunden . . . . .	—	0,3%
„ 12 „ . . . . .	—	0,8%

## 2. Gepreßte Platten aus Anilinharz Hartpapier:

Zugfestigkeit . . . . .	bis 1200 kg/cm <sup>2</sup>
Biegefestigkeit . . . . .	1800 kg/cm <sup>2</sup>
Schlagbiegefestigkeit . . . . .	über 25 cmkg/cm <sup>2</sup>
Spezifisches Gewicht . . . . .	1,32 . . . 1,36
Wärmebeständigkeit nach MARTENS . . . . .	über 120° C

Dielektrische Verluste	bei 20° C	bei 90° C
bei 50 Hz tg $\delta$ . . . . .	0,02 . . . 0,06	0,15 . . . 0,20

### Durchschlagsfestigkeit (Minutenwert in Öl von 90° C,

Plattendicke 5—8 mm):	
Senkrecht zur Papierlage . . . . .	bis 20 kV/mm
In der Papierlage . . . . .	„ 25 kV/mm
Wasseraufnahme bei 20° nach 1 Tag . . . . .	0,3 . . . 0,5%
7 Tagen . . . . .	1,5 . . . 2,0%

Es fallen besonders die gute Durchschlagsfestigkeit der Anilinharz Hartpapiere senkrecht zur Schichtrichtung auf und die geringe Feuchtigkeitsaufnahme. Diese Eigenschaften, vereint mit den relativ geringen Verlusten, lassen auch die Anwendung im Hochspannungsgebiet möglich erscheinen, besonders wenn es weiteren Arbeiten gelingt, die Wärmebeständigkeit noch zu verbessern. Das Material besitzt auch eine gute Kriechstromfestigkeit.

Aus der Patentliteratur der letzten Jahre ist zu ersehen, daß die Arbeiten auf dem Anilinharzgebiet energisch vorangetrieben werden. Die neuesten Entwicklungsarbeiten gehen in der Richtung, härtende Anilinharze aufzubauen, die in derselben Weise wie Phenol- und Kresolharze unter Druck und Hitze in eine höhere Polymerisationsstufe überzugehen imstande sind.

In Form von Spritzgußmassen haben die Styrolmassen besonders in der Fernmeldetechnik ausgedehnte Anwendung gefunden (vgl. S. 243 u. 71). Polystyrolmassen unter den Handelsnamen Trolitul und Amenit sind heute bereits in der Industrie genügend bekannt.

Neueren Datums ist die Verwendung der sog. Mipolame und Igelite als Spritzgußmassen und Preßmassen. Diese Stoffe sind auf Basis von Polyvinylchlorid aufgebaut und zeichnen sich durch außerordentlich hohe mechanische Festigkeit bei sehr guter Wasserbeständigkeit aus. In der Elektrotechnik kommen sie z. B. für Schutzkappen, sowie für die Herstellung von Spezialfabrikaten in Frage. Ihre elektrischen Eigenschaften sind ausgezeichnet, sie sind auch schwer entzünd-

bar und wenig brennbar, doch genügt die Wärmebeständigkeit nicht, um Träger spannungsführender Teile aus ihnen herzustellen.

Dasselbe gilt von den Akrylaten, die uns in Form von Plexigum und Plexiglas bekannt sind. Auch dieses Material ist wegen seiner hervorragenden Klarheit und glasartigen Beschaffenheit in der Elektrotechnik wertvoll, z. B. für Beobachtungsgläser, die plötzlichen Temperaturschwankungen unterworfen sind. Als „Stabol“ sind Akrylate in der Kabeltechnik besonders für Ummantelungen im Gebrauch (vgl. S. 72). Emulsionen bzw. Dispersionen von Vinylderivaten und Akrylaten finden bereits in der Papierindustrie zur Erhöhung der Wasserfestigkeit und der mechanischen Festigkeit Anwendung.

Sehr erfolgreich waren die Arbeiten der chemischen Industrie auf dem Gebiete der Lackharze. Die immer mehr notwendige Einschränkung der Verarbeitung von Leinöl und Holzöl hat Produkte gezeitigt, die uns heute für viele Fälle einen gleich- oder höherwertigen synthetischen Stoff bieten. Auf dem Gebiete der Alkydharze sind hervorragende Produkte entstanden. Alkydharze sind polymerisierbare Esterharze, deren Ursprung auf die Reaktionsprodukte zwischen mehrwertigen Alkoholen und mehrbasischen Säuren zurückgeht. Wir verwenden in erster Linie hierfür Glycerin und Phthalsäure bzw. Maleinsäureanhydrid. Alkydharze sind in den üblichen organischen Lösungsmitteln löslich; sie sind unter bestimmten Bedingungen auch härtbar. Die wertvollsten Eigenschaften geben sich in der sehr hohen Wärmefestigkeit der Harze, dem guten Isolationsvermögen und der guten Haftfestigkeit zu erkennen (vgl. S. 182).

Noch bis vor kurzer Zeit stand die Elektroindustrie auf dem Standpunkt, daß sich Isolierlacke lediglich auf Basis von Leinöl und Holzöl herstellen lassen. Diesen Standpunkt können wir heute aufgeben. Wir haben sowohl in den Alkydharzen, wie auch in den Phenol- und Kresolharzen Lackgrundstoffe, die als solche und in Verbindung mit Ölen und Harzen hervorragende Isolierlacke bieten. Durch die Vereinigung von fetten Ölen, Fettsäuren und Harzsäuren ist es der Industrie möglich, einen Teil des bisherigen Bedarfs an ausländischen fetten Ölen durch Heimprodukte zu ergänzen. Diese Öle, ob sie nun auf Basis von Alkydal oder Phenol und Kresol, mit Holzöl, Leinöl oder Harzsäuren aufgebaut sind, haben alle eine hohe Wärmebeständigkeit des Lackfilms, gute mechanische Widerstandsfähigkeiten und gute Haftfestigkeit. Auch die Cumaron- und Indenharze, welche aus Steinkohlenteer im Wege des Fraktionsverfahrens gewonnen werden, haben sich für die Lackindustrie wertvoll gezeigt.

Der in der Elektrotechnik häufig auftretenden Nachfrage nach schwer entflammbar oder schwer brennbaren Überzügen kommt die chemische Industrie durch die Lacke auf Chlorkautschukbasis oder

durch Mitverwendung gewisser feuerlöschender Chemikalien bei der Lackherstellung nach.

Nur kurz hingewiesen sei bei dieser Gelegenheit auf die Lacke, die auf Basis von Zelluloseestern und -äthern in der Niederspannungstechnik wertvolle Dienste leisten, ferner auf die Harnstoffharz-lacke, die berufen sind, als kriechstromfester Überzug zu dienen.

Das Gebiet der Verwendung von gießbaren Kunstharzen in der Elektrotechnik ist zur Zeit noch in erster Linie den Phenol- bzw. Kresolharzen vorbehalten. Diese haben mechanisch außerordentlich hochwertige Eigenschaften und weisen in der Elektrotechnik auf manche Möglichkeiten hin, wasserdichte Abschlüsse mit guten Isolationseigenschaften zu erzielen.

In der Elektrotechnik werden auch Klebharze verwendet, die neben gutem Bindevermögen in erster Linie elektrisch zuverlässig sein müssen. Synthetische Klebharze kennen wir eine ganze Menge, sowohl auf Phenolbasis, als auch im Harnstoffgebiet. Ferner sind die guten klebenden Eigenschaften der Alkydharze bekannt, und neuerdings bietet uns die chemische Industrie auch im Bereich der Vinyl- und Akryl-derivate hochwertige Klebstoffe.

Die chemische Industrie hat auch die Aufgabe gelöst, den Kautschuk auf synthetischem Wege aus heimischen Rohstoffen herzustellen. Die ersten Versuche, synthetischen Kautschuk zu gewinnen, reichen bis zum Jahre 1909 zurück. Im Jahre 1917 war bereits eine Fabrik im Gange, die einen Methylkautschuk (Dimethylbutadien) erzeugte. Dieses Produkt befriedigte hinsichtlich des Verhaltens bei der Alterung nicht und konnte mit dem nach dem Kriege verbilligten Naturkautschuk nicht mehr in Wettbewerb treten. Die Entwicklungsarbeiten wurden jedoch fortgesetzt, und es gelang, aus Butadien einen synthetischen Kautschuk zu entwickeln, der den an das Naturprodukt gestellten Anforderungen nicht nur genügt, sondern hinsichtlich der Alterungsbeständigkeit und Widerstandsfähigkeit gegen Mineralöle sogar übertrifft. Unter dem heutigen Handelsnamen Buna sind eine Anzahl von Typen auf dem Markt, die sich z.T. grundsätzlich voneinander unterscheiden. Zur Zeit sind die gebräuchlichen: Buna N für mineralölbeständige Mischungen, ferner Zahlen-Buna, z.B. die Sorten Buna 85 und 100, die zur Herstellung von Weichgummiqualitäten für technische Artikel dienen.

Wie bereits einleitend erwähnt, beschäftigt sich auch das Ausland intensiv mit Neuentwicklungen auf dem Gebiet der Kunststoffe; z.B. bringen die Vereinigten Staaten unter dem Namen Chloropren ein chloriertes Material heraus, das ähnliche Eigenschaften besitzt wie unser Buna. Auch dieses Material ist über das Butadien auf das Azetylen zurückzuführen, ebenso wie das gleichfalls in Amerika hergestellte Dupren. Amerika stellt einen weiteren synthetischen Kautschuk auf



Basis von polymerisierten, polysulfurierten Olefinen her, unter dem Namen Thiokoll. Dieses Material soll sich in erster Linie für die Herstellung von Gashüllen eignen und das Helium 25 mal länger halten als die Hüllen aus reinem Naturgummi. Ein weiteres, in Deutschland gewonnenes, kautschukähnliches Material ist das Perduren, welches in ähnlicher Weise wie das amerikanische Thiokoll aufgebaut ist.

Holz in Form von Holzmehl findet als Füllstoff ausgedehnte Verwendung. Das Holzmehl verleiht den Massen erhöhte mechanische Festigkeit und verbessert die elektrischen Eigenschaften des gepreßten Stoffes. Sehr vielseitig ist die Industrie des zum Zellstoff (vgl. Abb. 149) aufgeschlossenen Holzes. Hierüber, besonders über die Papierherstellung und Anwendung in der Elektrotechnik, ist in einem früheren Vortrag bereits gesprochen (vgl. S. 156). Hydratzellulosen, z. B. in Form des Zellophans, finden für Drahtisolierung Verwendung. Als Stapelfaser bietet uns die Hydratzellulose für die Herstellung von Geweben im Gemisch mit Baumwolle außerordentlich wichtige Grundstoffe.

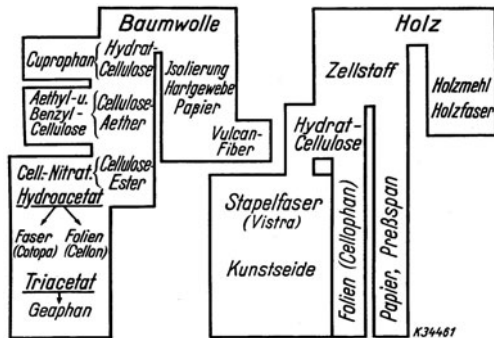


Abb. 149. Zellulosen.

Die Angleichung der Struktur dieser Faser an die Baumwolle hat die mechanische Festigkeit, z. B. von Preßplatten und Isolationen, außerordentlich vervollkommenet. Auch in der Kunstseidenindustrie findet die Hydratzellulose aus Holz bereits Eingang.

Auf die Verwendung von Baumwolle in Form von Gespinsten für Drahtisolierung kommen wir zurück. Hartgewebe aus Baumwolle werden in der Niederspannungstechnik wegen ihrer guten Wasserbeständigkeit gern verwendet. Auch die aus Lumpen hergestellten Papiere finden wir in der Niederspannungstechnik in Form der Vulkanfaser wieder. Vulkanfaser ist eine Hydratzellulose, deren Güte in erster Linie von dem Verhornungsprozeß abhängt. Sie kommt allerdings nicht in Frage als Träger spannungsführender Teile, wohl aber als Konstruktionsmaterial für Schaltergriffe, Entfernungsregler usw.

Die Äther der Zellulose, besonders Äthyl- und Benzylzellulose, sind wichtige Lackgrundstoffe. Die Benzylzellulose ist besonders wegen ihrer wasserabstoßenden Eigenschaften und der guten elektrischen Werte auch als Preßstoff aussichtsreich.

Der Gebrauch der Nitroverbindungen tritt mehr und mehr gegen die

Azetate zurück. Hydroazetate haben infolge der noch vorhandenen OH-Gruppen die Eigenschaft, Feuchtigkeit aufzunehmen. Die Triazetate sind den Hydroazetaten sehr überlegen. Sie zeigen neben einer erhöhten Wärmebeständigkeit gute elektrische Eigenschaften und eine sehr geringe Wasserempfindlichkeit. P. NOWAK und H. HOFMEIER<sup>1</sup> geben die Mittelwerte von reinem Triazetat wie folgt an:

Zugfestigkeit . . . . .	1000 kg/cm <sup>2</sup>
Druckdehnung . . . . .	4 . . . 8%
Doppelfalzzahl . . . . .	600
Gewichtszunahme in Luft von 60% relativer Feuchtigkeit . . . . .	0,3%
Dielektrische Verluste des lufttrockenen Films bei 50 Hz und	
20° C . . . . .	0,9%
40° C . . . . .	0,9%
60° C . . . . .	1,0%
80° C . . . . .	1,2%
Dielektrizitätskonstante bei	
20° C . . . . .	3,0
75° C . . . . .	3,0
Durchschlagsfestigkeit . . . . .	115 kV/mm
Die Werte sind gemessen an einem Film von 0,035 mm Stärke	

Die Triazetate vertragen ohne Veränderung der mechanischen und elektrischen Eigenschaften eine Dauertemperaturbelastung von 100 bis 120° C. Triazetate sind unter der Bezeichnung *Geaphan* bekannt.

Auch das Ausland arbeitet außerordentlich stark auf dem Gebiet der Verwendung azetylierter Baumwolle in der Isolationstechnik; z. B. bringt die Standard Telephone and Cable Ltd. in London unter der Bezeichnung *Cotopa* ein Monoazetat in den Handel, das im Vergleich mit Naturseide Vorteile erkennen läßt. Für den Isolationswiderstand bei 50% relativer Luftfeuchtigkeit ergab *Cotopa* rd. den 70fachen Wert von Naturseide. Das Material wird für die Herstellung von Schalttafelkabeln und für spezielle Drahtisolierungen empfohlen (vgl. auch S. 105).

Nachdem wir uns nun einen Überblick über die Grundstoffe der Isoliertechnik geschaffen haben, soll nunmehr erörtert werden, welche Überlegungen für den Konstrukteur bei der Auswahl der Stoffe für gewisse Verwendungen entscheidend sind.

## II. Isolierstoffauswahl beim Bau von Geräten.

Beim Gerätebau für nachstehend aufgeführte Anwendungszwecke haben wir bei der Auswahl und Verarbeitung der Grundstoffe unsere Materialkenntnis sachgemäß auszunutzen:

<sup>1</sup> Chem. Fabrik Bd. 10 (1937) S. 13.

1. bei mechanisch stark beanspruchten Geräten,
2. bei wärmebelasteten und feuersicheren Geräten,
3. bei Feuchtraumgeräten,
4. bei Geräten mit Kriechstrombeanspruchungen,
5. bei allen Geräten in chemischen Fabriken.

### 1. Auswahl bei mechanisch stark beanspruchten Geräten.

Zur Erzielung ausreichender mechanischer Festigkeiten, z. B. einer guten Stoßfestigkeit, sind verschiedene Wege zu beschreiten:



Abb. 150. Abgerundete Kanten im Staubsauger-Motorgehäuse.

1. eine bestimmte Formgebung des Preßstückes, z. B. eine Gewölbeformbildung, gleichmäßige Wandstärken, sowie die Vermeidung scharfer Kanten, Abb. 150;

2. Verstärkung der Wandungen durch eingepreßte Rippen oder durch Hohlwände mit Verstärkungsbrücken, Abb. 151 u. 152;

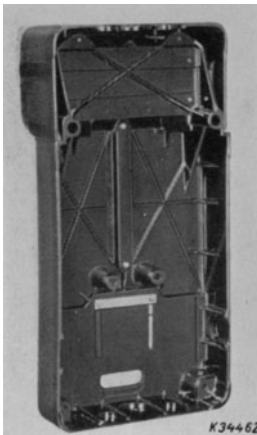


Abb. 151. Verstärkungsrippen im Zählertafelbau.

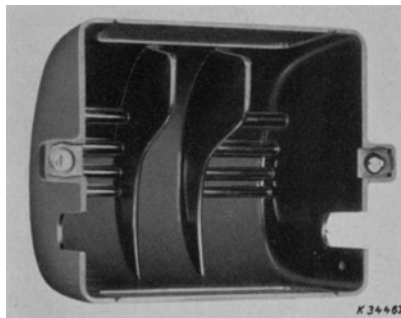


Abb. 152. Hohlkörper mit Verstärkungsrippen.

3. Verstärkung besonders beanspruchter Teile des Formstückes, z. B. von Bodenflächen, durch Einlage starker Gewebestücke oder durch Metallgewebe oder -platten;

4. Verwendung mechanisch hochwertiger Preßstoffe der Type T und Schichtstoffe auf Papierbasis.

Durch Maßnahmen gemäß Punkt 1—3 sind wir imstande, Geräte aus Preßstoff mechanisch zu versteifen. Über den Punkt 4, nämlich über die mechanisch hochwertigen Preßstoffe, seien noch einige Ausführungen gemacht. Es scheint, als ob sich in den Kreisen der Konstrukteure und der Verbraucher eine irrtümliche Auffassung über das Wesen der Schichtstoffe und Faserstoffe bemerkbar macht. Dieser Stoff unterscheidet sich z. B. von Material Typ S lediglich durch die Verwendung besonderer Formen der Füllstoffe. Als Füllstoff für Massen Typ T dienen Leinen-

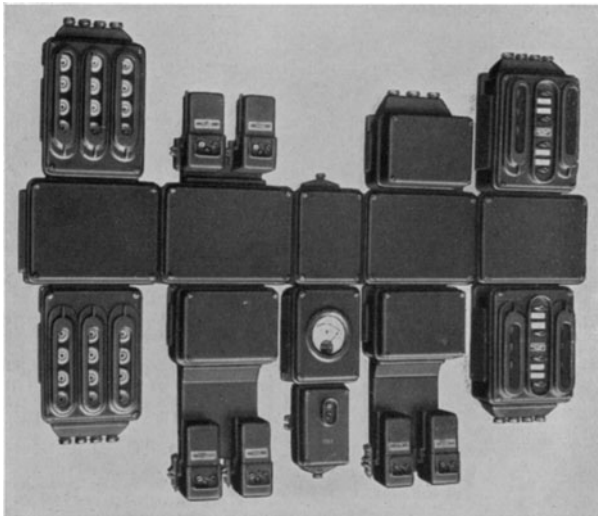


Abb. 153. Isolierstoffgekapselte Schaltanlage.

schnitzel, Papierschnitzel, gesponnener Faden, für Schichtpreßstoffe Papierbahnen. Die Schlagbiegefestigkeit von Stäben aus mit diesen Füllstoffen hergestellten Massen erreichen bei Verwendung von Papierbahnen Werte von  $25 \text{ cmkg/cm}^2$  und darüber. Auch der unter Verwendung von Asbestfadenmaterial hergestellte Typ M kommt diesen Werten nahe. Es folgt dann das Baumwoll-Schnitzelmaterial Typ T mit etwa  $12 \text{ cmkg/cm}^2$ , ferner die Massen aus Papier- und Pappeschnitzeln und zum Schluß die mit Holzmehl gefüllten Preßmassen mit etwa  $6 \text{ cmkg/cm}^2$ . Die Biegefestigkeiten liegen in einer ähnlich fallenden Linie. Auch hier zeigen die ganz oder teilweise geschichteten Stoffe die Höchstwerte (vgl. S. 118 und die Zahlentafel am Schlusse des Buches).

Nach den an Stäben erzielten Werten würde das geschichtete Material z. B. gegenüber dem Schnitzelmaterial Vorteile bieten. In

der Praxis liegen diese Verhältnisse etwas anders. Verpreßt man die geschichteten Materialien zu Formstücken, so tritt leicht eine Zerreißung der Schichten ein und je nach der Steigebeanspruchung der Massen eine ungleiche Gerstverteilung. Das Endergebnis im Formstück ist, daß die mechanischen Werte der einzelnen Faserstoffmaterialien sich im Preßstück ausgleichen. Wohl sind die Werte alle höher als bei Typ S; sie liegen in ziemlich gleicher Linie mit Typ T. Da Typ T Baumwollschnitzel enthält, ist natürlich die Verwendung von Papier als Füllstoff ein wirtschaftlicher Vorteil. Voll zum Ausdruck kommen dagegen die Werte des Schichtmaterials für die Herstellung flacher, plattenhnlicher Gegenstände.

Konstruktive Maßnahmen, vereint mit der richtigen Auswahl des Prestoffes haben in den letzten Jahren mechanisch außerordentlich hochwertige Geräte entstehen lassen, wie z. B. die isolierstoffgekapselten Schaltanlagen, Abb. 153.

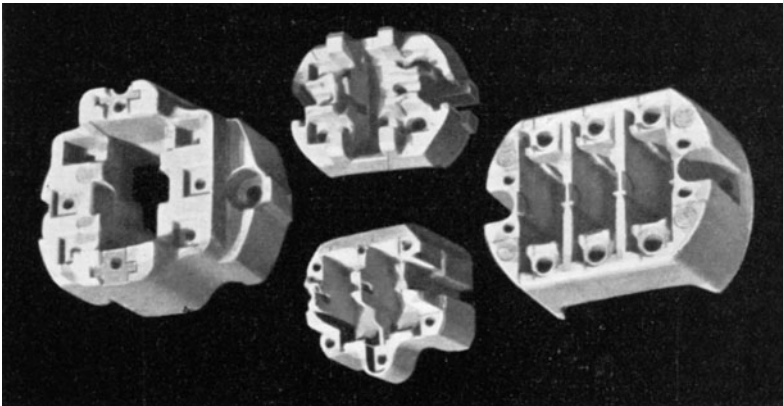


Abb. 154. Schaltersockel aus Steatit für Heizgeräte.

## 2. Auswahl bei wärmebelasteten und feuersicheren Geräten.

Feuerfest und damit lichtbogensicher sind allein die anorganischen Werkstoffe. Es stehen uns für die Niederspannungstechnik zur Verfügung:

1. keramische Stoffe und Glas (Abb. 154—156),
2. Mykalex (Abb. 157 u. 158),
3. Asbest und Asbestzement,
4. Marmor und Schiefer.

Um Geräte zu konstruieren, bei denen man sich mit einer geringeren Wärmebeständigkeit abfinden kann, haben wir die Möglichkeit

1. der Verwendung von Preßmassen, besonders auf Phenol- und Kresolbasis, mit anorganischen Füllstoffen und
2. bis zu einer geringen Belastungsgrenze auch die Möglichkeit der Verwendung organischer Preßmassen mit organischen Bindemitteln und im Bedarfsfalle Anbringung eines keramischen Schutzes (Abb. 159—161).

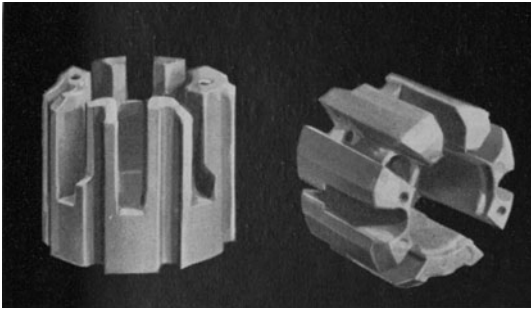


Abb. 155. Walzenschalterteile aus Steatit.

Für die Fortschritte der Verformung, z.B. von Steatit-, Calit- und Porzellanmaterial in den letzten Jahren sei auf S. 140 verwiesen.

Glas im Installationsbau ist bis heute auf dem deutschen Markt nur in der Glühlampenindustrie als Isolierung anzutreffen. In der allerletzten Zeit scheint sich die Entwicklung feinsten Glasseide aussichtsreich zu

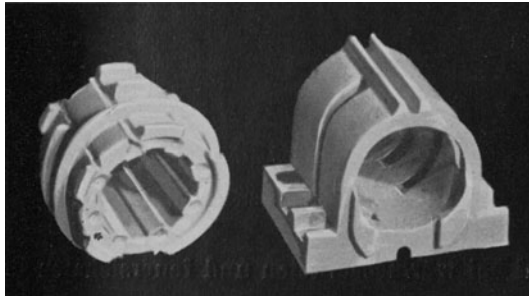


Abb. 156. Schaltersockel aus Steatit.

gestalten. Die Glasindustrie stellt bereits Fäden in der Stärke von 0,002 bis 0,010 mm her.

Mykalex als rein anorganische Preßmasse ist seit Jahren bekannt. Durch Verwendung von Bleiglas mit feinst gemahlenem Glimmer ist die effektive Wärmebeständigkeit durch den Erweichungspunkt des Glases bedingt. Die mechanischen Eigenschaften sind gut. Bei einer Biegefestigkeit von  $1000 \text{ kg/cm}^2$  haben wir eine Schlagbiegefestigkeit von  $5 \text{ cmkg/cm}^2$

und eine Martenszahl von  $400^{\circ}$ . Wertvoll ist besonders die Eigenschaft, daß das Mykalex selbst schroffen Temperaturwechseln ausgesetzt werden

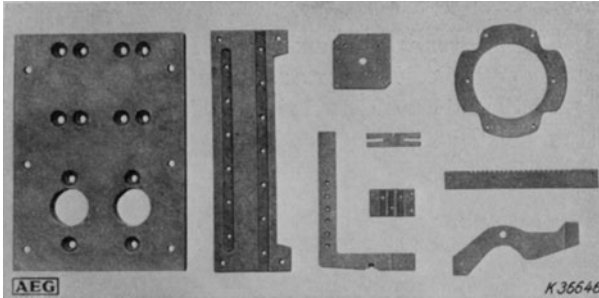


Abb. 157. Aus Platten herausgearbeitetes Mykalex.

kann. Naturgemäß ist es etwas schwieriger, ein derartiges Material im Preßwege zu verformen, da die Preßtemperatur in der Stufe des Erweichungspunktes des Glases liegt. Vielseitige Formstücke lassen sich sowohl im Wege der spanabhebenden Bearbeitung, als auch im Preßwege gewinnen.

Asbestemente verwendet die Niederspannungstechnik in erster Linie als Funkenlöschmaterial. Diese Stoffe, ebenso wie die unter der Bezeichnung Funkenlöschmaterial sonst auf dem Markt befindlichen Massen, sind keine Isolierstoffe im elektrischen Sinne, da sie infolge Wasseraufnahme ihre Isolierfähigkeit mit der Zeit vermindern.

Marmor und Schie-

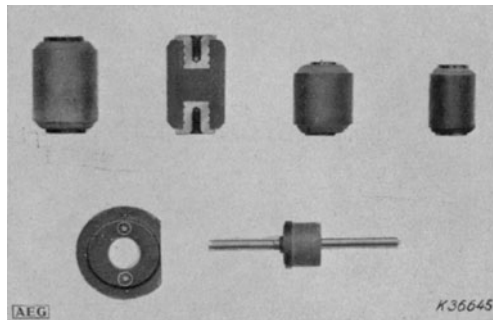


Abb. 158. Mykalex-Formpreßstücke.

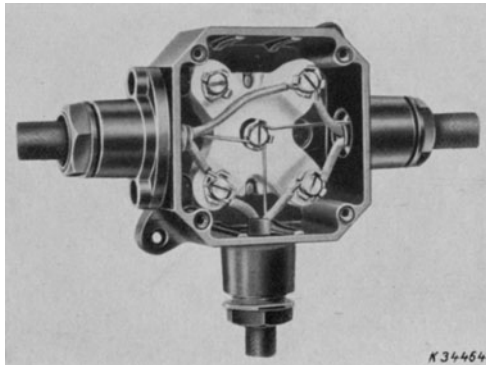


Abb. 159. Abzweigdose mit keramischem Einsatz.

fer sind als Ausgangsmaterial für Grundplatten, Schalttafeln usw. bekannt (vgl. S. 225). Der Schiefer bildet wegen seines Gehaltes an organischen Bestandteilen bereits den Übergang zu den nur begrenzt feuersicheren Preßmassen.

In vielen Fällen ist es wünschenswert, z. B. für den Bau der Träger spannungsführender Teile, Preßmassen zu verwenden, deren hohe mechanische Festigkeit besonders bei komplizierten Werkstücken ausgenutzt werden soll. Hierfür kommen in erster Linie Phenol- und Kresolmassen mit anorganischen Füllstoffen in Frage.

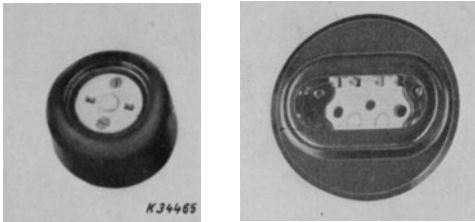


Abb. 160. Steckdosen mit keramischen Einsatz.



Abb. 161. Flachkontaktstift-Steckdose „Flaho“.

Wir sind gewohnt, die Wärmebeständigkeit der Preßmassen nach Martenszahlen zu bewerten, d. h. also nach dem Verhalten in der Wärme bei einer Biegebeanspruchung von  $50 \text{ kg/cm}^2$ . Die Martenszahl zeigt an, bis zu welcher Temperatur wir ein Material verwenden können, bevor es sich unter einer bestimmten Last durchbiegt. Die Martenszahl gibt also nicht die effektive Wärmebeständigkeit eines Konstruktionsteiles an. Diese liegt z. B. bei den anorganisch gefüllten Phenolharz-Preßmassen höher. Sie ist begrenzt durch den Zersetzungspunkt des

organischen Bindemittels, der im allgemeinen über  $250^\circ \text{C}$  liegt, sie ist aber bis zu dieser Temperatur auch nicht voll ausnutzbar, weil durch den fortschreitenden Härtungsprozeß Schrumpfungerscheinungen und dadurch Rückgang der mechanischen Festigkeit eintreten können (vgl. S. 101).

Typ 1 wird aus kurzen Asbestfasern hergestellt, die neuerdings wegen der Verknappung der Asbestmaterialien mit gutem Erfolg durch Silikate als Füllstoff ergänzt werden. Typ M ist ein fester, hochwertiger Werkstoff, zu dessen Herstellung Asbestfäden und -gespinste dienen.

Die räumliche Verteilung des Füllstoffes, besonders der Faser, also



eine ausgesprochene Skelettwirkung, ist von ausschlaggebendem Einfluß auf die Wärmefestigkeit einer Preßmasse. Durch Skelettwirkung erklärt sich auch die Tatsache, daß selbst bei Papierschichtmassen Martenszahlen von 200° und darüber zu erreichen sind.

Neben einer bestimmten Mindestwärmebeständigkeit muß, sofern ein Material als Träger spannungführender Teile verwendet wird, die zusätzliche Forderung erfüllt werden, daß selbst bei auftretenden Glüherscheinungen, z. B. Wackelkontakten, die Kontaktteile durch die verkohlten Rückstände noch soweit festgehalten werden, daß keine Lockerung der Kontakte auftritt. Diese Eigenschaft wird von den Phenol- und Kresolmassen mit anorganischem Füllstoff erfüllt. Andere Harze, z. B. die der Harnstoffgruppe, zeigen eine derartig hohe Wärmebelastungsmöglichkeit nicht. Schon bei Temperaturen um 100° tritt eine Vergasung ein und das Material verflüchtigt sich ohne Bildung eines Kohleskeletts. Aus diesem Grunde scheidet das Harnstoffmaterial in wärmebelasteten Geräten und im allgemeinen auch als Träger spannungführender Teile aus.

Sehr gute Wärmefestigkeiten, auch verbunden mit einer relativen Feuersicherheit, zeigen die Massen des Typs 2, also die sog. Kaltpreßmaterialien, die einen hohen Gehalt an anorganischem Füllstoff haben. Auch die Preßmassen des Typs 4 sind gut wärmebeständig. Sie haben als Bindemittel stark verkockte Peche bzw. hochpolymerisierte Holzöle.

Bei den Kunstharzmassen mit organischen Füllstoffen, wie Holzmehl, Papier, Baumwollschnitzel usw., ist die Wärmebelastungsgrenze durch den Füllstoff bedingt. Dauerbelastungen von 100° C können besonders bei Preßmassen mit Faserfüllstoff<sup>1</sup> unerwünschte Veränderungen in den Preßmassen mit sich bringen. Man sollte daher diese Preßmassen für die Herstellung von über 100° wärmebelasteten Geräten vermeiden.

Ob und wie weit sich die Anilinharze als Baustoff in wärmebelasteten Geräten eignen werden, ist zur Zeit noch nicht zu übersehen. Das heute auf dem Markt befindliche, nichthärtende Harz hat eine Martenszahl von 100...120°. Es hinterläßt bei der Verbrennung ebenso wie das Phenolharz Kohle und zeigt bei Temperaturen von 200...250° C und darüber Zersetzungserscheinungen.

Ein Weg, besonders im Maschinenbau die Leistung erhöhen bzw. die Maschinen kleiner gestalten zu können, führt über die Verbesserung der thermischen Eigenschaften der Isolierstoffe, hat aber nicht die Erhöhung der Temperaturbeständigkeit im Auge, sondern die Verbesserung des Wärmeleitvermögens. Das Prinzip dieses Verfahrens ist, daß die Leistung einer Maschine gesteigert werden kann, wenn die Wärme aus dem Innern schnellstens entfernt wird. Da alle organischen Stoffe schlechte Wärmeleiter sind, muß die Wärmestauung vermindert werden durch die Erniedrigung der sog. Wärmewiderstände.

<sup>1</sup> NITSCHKE u. SALEWSKI: Plastische Massen Bd. 7 (1937) H. 1 u. 2.

Zahlentafel 10. Wärmeleitfähigkeit von Metallen und Isolierstoffen.

	Wärmeleitfähigkeit W cm <sup>-1</sup> Grad <sup>-1</sup>		Wärmeleitfähigkeit W cm <sup>-1</sup> Grad <sup>-1</sup>
Kupfer . . . . .	3,9	Papier . . . . .	0,0013
Aluminium . . . . .	2,0	Papier m. Lack getränkt	0,062 . . . 0,0015
Eisen . . . . .	0,5	Kolophonium . . . . .	0,0075
Eisenblech. . . . .	0,2 . . . 0,6	Styrol . . . . .	0,0011
Eisenblech. . . . .	0,005 . . . 0,012	Anilin . . . . .	0,00067
Quarz . . . . .	0,126 . . . 0,065	Baumwolle . . . . .	0,00069
Amorpher Quarz . . . . .	0,0126	„ m. Lack getränkt	0,0025
Glas Porzellan . . . . .	0,012 . . . 0,005	Leinen lackiert . . . . .	0,0015
Glimmer . . . . .	0,0036	Sand . . . . .	0,0025
Mikanit . . . . .	0,0012	Vergußmasse . . . . .	0,00096
Hartgummi . . . . .	0,00164	Ganz dünne Luftschicht	0,0005
Preßspan, lackiert . . . . .	0,0014	Metalloberfläche gegen	
Preßspan, ölgetränkt . . . . .	0,0025	Luft bei 40° Übertemp.	0,00124

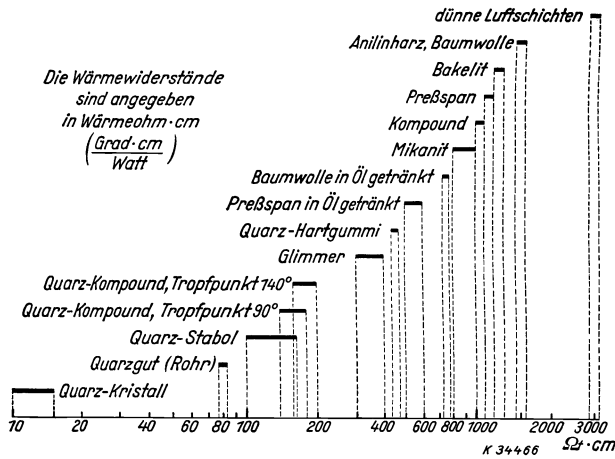


Abb. 162. Wärmewiderstände verschiedener Isolierstoffe.

Die Zahlentafel 10 zeigt eine Übersicht der Wärmeleitfähigkeit einiger Isolierstoffe, in Abb. 162 sind die „Wärmewiderstände“ veranschaulicht. Auf diesem Gebiete hat besonders A. MEISSNER<sup>1</sup> grundlegend gearbeitet. Er hat sein Ziel, organischen Isolierstoffen (Compounden) ein größeres Wärmeleitvermögen zu geben, durch die Mitverwendung kristalliner Isolierstoffe (Quarzsand) als Füllmittel erreicht.

Die als thermoplastische Massen bekannten, nichthärtenden synthetischen Kunststoffe kommen im allgemeinen für den Aufbau wärme-

<sup>1</sup> MEISSNER, A.: ETZ Bd. 56 (1935) S. 1236.

belasteter Geräte noch nicht in Frage. Der vorläufig in den Stufen von 60 . . . 90° C liegende Erweichungspunkt läßt keine Garantie zu. Unter der Bezeichnung Luvican ist in letzter Zeit ein synthetisches organisches Produkt auf den Markt gebracht, welches bei einer Wärmebeständigkeit nach MARTENS bis 150° gute mechanische Festigkeit besitzt und sich im Wege des Spritz- und Preßverfahrens verarbeiten läßt.

### 3. Auswahl bei Feuchtraumgeräten.

Für Geräte in feuchten Räumen ist ebenso wie für kriechstromsichere Geräte und für die in chemischen Fabriken einzubauenden Apparaturen die Grundbedingung hohe Wasserfestigkeit.

Wasserfest ist keramisches Material. Als Träger spannungsführender Teile, z. B. für Geräte unter Tag, wird der Konstrukteur deswegen in erster Linie Porzellan, Calit und Steatit bevorzugen (vgl. S. 126). Den Vorteilen der Unbrennbarkeit und der Wasserfestigkeit der anorganischen Massen steht das verminderte Gewicht, die bessere Lehrenhaltigkeit, die größere mechanische Festigkeit und die leichtere Verformbarkeit der Massen mit organischen Bindemitteln gegenüber. Die Wahl, ob keramisch oder organisch mit anorganischem Füllstoff, muß daher in jedem Einzelfall vom Konstrukteur gewissenhaft geprüft werden.

Daß es nicht gelingt, z. B. durch Lacküberzüge ein an und für sich hygroskopisches Material soweit vor dem Eindringen von Feuchtigkeit zu schützen, daß die elektrischen Anforderungen gewährleistet bleiben, weiß jeder Lacktechniker. Lacke neigen zur Haarrißbildung, deren Entstehen nicht nur auf chemische Vorgänge zurückzuführen ist, sondern auch durch Verflüchtigung von Weichmachern usw. bedingt sein kann (vgl. auch S. 77). Das Wasserfestmachen von Geräten jeder Art durch Überzüge kann nur zum Ziel führen, wenn unter Heranziehung der Materialkenntnis in einem oder mehreren Lackaufträgen die Eigenschaften der Lacke aufeinander abgestimmt werden. Im allgemeinen ist es ratsam, eine Oberflächenbehandlung nur als Ergänzungsmaßnahme aufzufassen und in erster Linie das Material des Gerätes möglichst feuchtigkeitssicher aufzubauen.

Holzmehl-, Zellulose- und Faserstoffmassen zeigen entsprechend dem vorhandenen Harzgehalt und der Art der Durchtränkung stark unterschiedliche Neigung zur Aufnahme von Feuchtigkeit. Sämtliche Hart-



Abb. 163. Schlagwettersgeschützter Motorschutzschalter.

papiere behalten die Saugfähigkeit der Papierfaser, wenn nicht durch ganz besondere Maßnahmen bei der Herstellung ein zuverlässiger Abschluß oder Einschluß der Faser erreicht ist (vgl. S. 159).

Die Wasseraufnahme einzelner typisierter Preßmassen liegt z. B. in folgender Größenordnung<sup>1</sup>:

Wasseraufnahme nach 7 Tagen:	
Typ S . . . . .	200 mg/100 cm <sup>2</sup>
„ O . . . . .	200 „ „
„ I . . . . .	50 „ „
„ M . . . . .	60 „ „
„ T . . . . .	500 „ „

Die Feuchtigkeitsaufnahme wirkt sich im Gerät aus:

1. durch Rückgang der Isolationswerte;
2. durch Ansteigen der dielektrischen Verluste;
3. durch gelegentliche Kriechwegbildungen;
4. durch Volumenänderungen;
5. durch Korrosionserscheinungen an den eingepreßten Kontaktteilen.

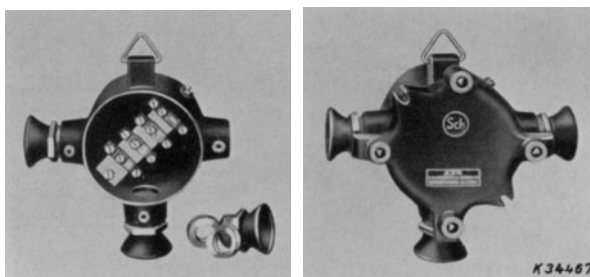


Abb. 164. Schlagwettergeschützte Abzweig-Verbindungsboxen.

Hinsichtlich der Feuchtigkeitsaufnahme sind die Hartgewebe außerordentlich viel günstiger als Hartpapier. Es empfiehlt sich daher, in feuchtigkeitsgefährdeten Räumen an Stelle von Hartpapieren stets Hartgewebe zu verwenden. Auf alle Fälle sind die für feuchtigkeitsgefährdete Räume bestimmten Geräte, also besonders auch die Geräte unter Tag, nur aus wasserunempfindlichen Materialien zu bauen und durch eine zusätzliche Oberflächenbehandlung oder durch Kapselung feuchtigkeitsicher zu schützen (Abb. 163 bis 166).

Wie aus der Zahlentafel hervorgeht, sind die Typen I und M, also die Preßmassen mit anorganischem Füllstoff, hinsichtlich der Wasseraufnahme sehr viel besser als die Preßmassen mit organischem Füllstoff. Mit Massen der Typen I und M lassen sich hohe und höchste Feuchtig-

<sup>1</sup> PABST: Kunststoff-Taschenbuch, 2. Aufl. Berlin 1937.

keitssicherheiten gewährleisten. Die hier verwendeten Füllstoffe haben keine wasseraufsaugenden Eigenschaften. Diese Typen können daher auch ohne Bedenken als Konstruktionsmaterial für die Herstellung von Trägern spannungsführender Teile benutzt werden.

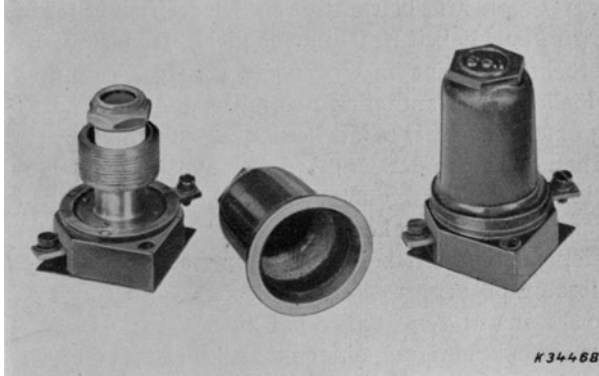


Abb. 165. Schlagwetterschutzte Sicherung.

Füllstofffreie Harze, die reinen „Preßharze“, wie sie heute bereits im Handel sind, zeigen sehr gute Wasserfestigkeiten. Besonders zeichnet sich hier das Anilinharz aus, welches ausgesprochen wasserabstoßende Eigenschaften besitzt.

Auch die Vinyl- und Akrylderivate haben eine unbedingte Wasserfestigkeit, sofern sie ohne Füllstoffe verarbeitet werden. Als Abdeckmaterial ist diesen Massen eine Zukunft zu versprechen. Sie eignen sich auch sehr gut für die Herstellung wasserfester Anstriche.

#### 4. Auswahl bei Geräten mit Kriechstrom-Beanspruchungen.

In den letzten Jahren ist der Begriff der Kriechstromfestigkeit bzw. Kriechstromsicherheit viel umstritten worden (vgl. S. 95).

Wir kennen Stoffe, bei denen Übergangsströme überhaupt nicht entstehen. Es gibt aber auch unter den anorganischen und organischen Massen solche, bei denen unter gegebenen Bedingungen wohl Übergangsströme entstehen können, wo jedoch nach Beseitigung der den Strom-

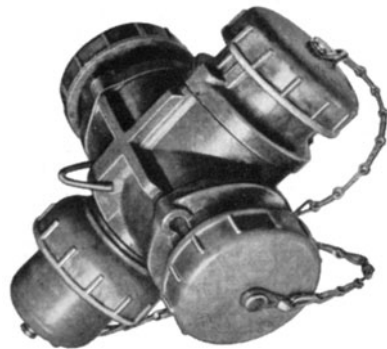


Abb. 166. Isolierstoffgekapselte Kupplung. Gehäuse aus Typ M.

durchgang bedingenden Ursachen die Geräte in ihrer Isolation nicht beeinträchtigt sind.

Zur Gattung der ersten Gruppe gehören glasierte keramische Massen, deren Oberfläche die Ansammlung von Feuchtigkeit verhindert. Zur zweiten Gruppe gehören sowohl keramische wie organische Stoffe, die an und für sich wohl kriechstromfest sind, jedoch dem Staub, Salzen und Säuren, sowie Feuchtigkeit Haftungsmöglichkeiten bieten. In der Niederspannungstechnik scheint im Gegensatz zur Hochspannung die Gegenwart von löslichen Bestandteilen aus Salzen, Säuren und Staub für die Einleitung eines Kriechweges Vorbedingung zu sein.

Wir haben es aber in der Hand, durch zweckentsprechende Auswahl der Materialien und der Konstruktionsmethoden Kriechwegbildungen vorzubeugen und können daher kriechstromfeste Geräte durch geeignete Konstruktionsmaßnahmen bei Verwendung selbst nicht kriechstromfester Isolierstoffe bauen.

A: Die Auswahl der Stoffe hat zu erfolgen:

1. unter Berücksichtigung einer möglichst glatten Oberfläche;
2. unter Ausschaltung hygroskopischer Stoffe und
3. unter Berücksichtigung der an und für sich kriechstromfesten Massen.

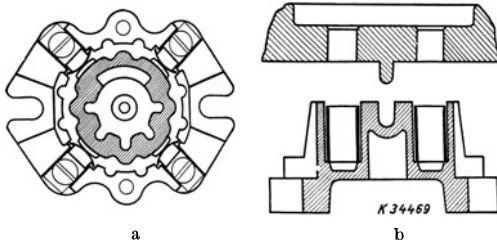


Abb. 167. a Sockel und Drehstern für Installations-Drehschalter. Vergrößerung der Kriechstrecken durch eingepreßte Nut.

b Steckdose mit Abdeckung. Vergrößerung der Kriechstrecken durch Nut und Zapfen.

B: Die bei der Konstruktion zu treffenden Maßnahmen sind:

1. Verlängerung der Kriechwegstrecken durch Vorsehen größerer Wegstrecken, auch durch Einlagerung von Rippen und Leisten, Abb. 167;
2. Oberflächenbehandlung der Isolier-

stoffe, wie Schutzanstriche oder z. B. bei Hartpapieren Überpressen mit kriechstromfesten Hartpapieren;

3. Verhinderung der Staub- und Feuchtigkeitsablagerung auf dem Wege der Kapselung.

Bei Berücksichtigung dieser Vorsichtsmaßnahmen ist der Konstrukteur imstande, unter einer Reihe von Methoden sich die zweckentsprechendste auszuwählen.

Ob ein organisches Material kriechwegfest ist, ergibt sich durch eine kurze Vorprüfung am besten in der Weise, daß zwischen Elektroden, deren Entfernung 3—6 mm beträgt, bei einer bestimmten Strombegrenzung ein Stromübergang eingeleitet wird. Hierzu ist es nötig, die

Zwischenstrecke mit einer schwachen Lösung von Alkalien oder Salzen zu benetzen. Bei kriechstromfesten Materialien stellt sich nach dem Verdunsten der Flüssigkeit höchstens eine Glimmzone senkrecht zur Verbindungslinie der Elektroden ein, ohne daß eine Brückenbildung stattfindet (vgl. S. 68).

Bei nicht kriechwegfesten Materialien brennt zwischen den beiden Elektroden eine unmittelbare Brücke ein, die leitend bleibt.

Ein Bild aus der Praxis (Abb. 168) mag veranschaulichen, wie eine Betriebsstörung durch Kriechwegbildung eintreten kann. Die Tafel mit Sicherungskörpern ist einer Anlage in einem Industriehafen entnommen, die infolge Kurzschluß durch Kriechweg zum Stillstand kam.

Die Kriechwegfestigkeit unserer Harze ist eine Funktion der Schmelzbarkeit. Im allgemeinen sind die Harze kriechwegfest, die einen Schmelzpunkt besitzen und daher imstande sind, die bei der Verbrennung abgeschiedene Kohle ständig mit geschmolzenem Harz wieder zu imprägnieren. Bei härtenden Harzen, besonders solchen, die bis zu einem unerschmelzbaren Endpunkt härten, kann man daher im allgemeinen keine Kriechwegfestigkeit erwarten.

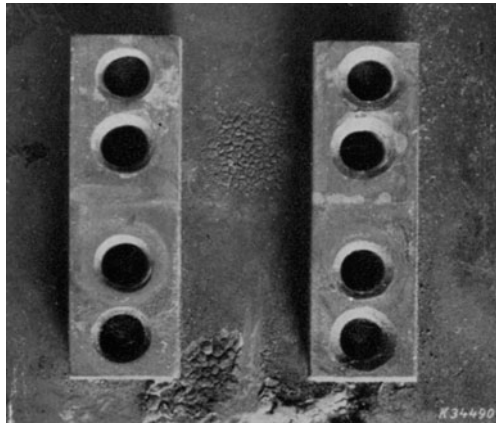


Abb. 168. Kriechwegbildung an einer Grundplatte aus Typ S.

Ein typisches Beispiel hierfür sind die Phenol- und Kresolharze. Die Verdichtung bei Temperaturerhöhung geht hier stets bis zum unerschmelzbaren Endprodukt. Selbst geringprozentige Mischungen schmelzbarer Harze mit härtenden Harzen zeigen keine zuverlässige Kriechstromfestigkeit mehr. Anilinarharze gehören zu den kriechstromfesten Harzen. Auch das bereits erwähnte Luvican gehört zur Gruppe der kriechwegfesten Harze, ebenso wie die Alkydharze in dieser Hinsicht wertvolle Eigenschaften besitzen. Auch Naturharze, wie z. B. der Schellack, sind in hohem Maße kriechstromfest. Für kriechstromfeste Schutzanstriche werden wir uns bei der Herstellung von Lacken auf die Verwendung der vorstehend genannten Harze stützen können. Temperaturbehandelte Öllacke können als kriechwegfest gelten.

Erfolgt durch langdauernde Wärmenachbehandlung eine weitere Nachhärtung, so geht die Kriechstromfestigkeit zurück; Harze sind also im allgemeinen nur bis zu einer bestimmten Wärmehöchstbelastung als

kriechstromfest anzusehen. Die an und für sich kriechstromfesten Harnstoff-Formaldehydharze zeigen, wie schon erwähnt, in der effektiven Wärmebeständigkeit Eigenschaften, die ihrer Verwendung als Träger stromführender Teile entgegenstehen. Diese Harze eignen sich hingegen als Abdeckmaterial und für sonstige Verwendung in der Niederspannungstechnik außerordentlich gut.

### 5. Auswahl bei Geräten in chemischen Fabriken.

Von einem Material, welches in chemischen Fabriken verwendet werden soll und somit dem Einfluß von Chemikalien in Gasform oder in Lösung ausgesetzt ist, muß in erster Linie verlangt werden, daß es feuchtigkeitsicher ist. Wie schon erwähnt, genügt ein Niederschlag von Feuchtigkeit bei Anwesenheit geringer Mengen Säuredämpfe und Staub, um Kriechwege oder Verrostungen hervorzubringen. Also ist die zweite notwendige Forderung, daß alle in chemischen Fabriken eingesetzten Geräte kriechwegsicher konstruiert sein müssen. Auch in Industriegegenden, in der Nähe von Fabriken, Hafenanlagen usw. sind Spuren von Säuren, Alkalien und Ruß stets vorhanden und somit ist auch hier die Entstehung von Umständen gegeben, die schließlich Zerstörungen verursachen können.

Nicht nur die Geräte in den Fabrikationsräumen der chemischen Industrie sind daher unter besonderen Vorsichtsmaßnahmen vom Konstrukteur auszuwählen, sondern auch die Leitungen, die Motoren, die Schaltvorrichtungen; kurz, bei allen Installationen ist hier mit den Möglichkeiten der schädigenden Einflüsse zu rechnen.

Wenn wir uns noch einmal die Widerstandsfähigkeit, z. B. der Preßstoffe gegen chemischen Einfluß — ohne Berücksichtigung der Kriechwegsicherheit — vor Augen halten, so zeigt sich, daß Phenol- und Kresolharze weitgehend gegen Säuren beständig sind. Die Säurebeständigkeit der Phenolharze geht sogar so weit, daß, wie bekannt, Phenolharzüberzüge zur Auskleidung von säurefesten Bottichen Verwendung finden.

Harnstoff- und Anilinharze als Harze basischen Charakters zeigen naturgemäß eine geringere Säurebeständigkeit, dagegen eine hervorragende Alkalifestigkeit. Kohlenwasserstoffharze, z. B. die Polystyrolmassen, sind sowohl gegen Alkalien wie gegen Säuren beständig. Auch die Kunststoffe auf Polyvinyl- und Polyakrylbasis bilden wertvolle Grundstoffe.

Was die Empfindlichkeit gegen Lösungsmittel anbelangt, so sind gut ausgehärtete Phenol- und Kresolharze weitgehend gegen alle organischen Lösungsmittel beständig, ebenso gegen Fette und Öle. Auch die Harnstoff- und Anilinharze verhalten sich gegen die gebräuchlichen Lösungsmittel stabil. Auf der anderen Seite kann man bei den oben erwähnten thermoplastischen Harzen nicht von einer generellen Lösungsmittel-



widerstandsfähigkeit sprechen. Sie sind zum Teil beständig gegen aliphatische Kohlenwasserstoffe und Alkohole, zeigen dagegen auf der anderen Seite bei der Einwirkung von aromatischen Kohlenwasserstoffen Quellungs- und Lösungserscheinungen.

### III. Isolierstoffe für Drahtisolation.

Nachdem wir im Vorstehenden Einzelheiten über den Bau von Geräten in der Niederspannungstechnik behandelt haben, wenden wir uns nunmehr der Drahtisolation und dem Maschinenbau zu.

Die Drahtisolation unterteilen wir in zwei Klassen (Regeln für die Bewertung und Prüfung elektrischer Maschinen, REM, VDE 0530).

1. Die Isolation der Klasse A: Beständigkeit ist gewährleistet für eine Übertemperatur von 60° bzw. 70°.

2. Die Isolation der Klasse B: Zulässige Übertemperatur 80° bzw. 90°.

Für die Drahtisolation der Klasse A stehen uns zur Verfügung:

1. organische Gespinste wie Seide, Kunstseide, Baumwolle;
2. Papierbänder;
3. Zellulose-Azetatbänder, z. B. Geaphan;
4. verschiedene Lacke als solche oder in Verbindung mit Stoffen der Gruppen 1 und 2.

Für die Isolation der Klasse B können wir verwenden:

1. Asbestfabrikate;
2. Mikanitbänder;
3. Glaswolle;
4. Lacke in Verbindung mit Gruppen 1...3;
5. Es ist ferner beabsichtigt, auch Drahtlacke in Klasse B einzugliedern.

Einige Isolationsmöglichkeiten von Drähten und Litzen sind in nachstehenden Zahlentafeln übersichtlich zusammengestellt:

Zahlentafel 11.

#### 1. Kleinstmotorenbau.

1. Lack-Isolierung.		2. Kunstseide.	
2 × Lack		1 × Kunstseide	
Blanker Draht, mit Auftrag	0,45 mm ∅	Blanker Draht, mit Auftrag	0,75 mm ∅
„ „ ohne „	0,40 mm ∅	„ „ ohne „	0,60 mm ∅
1 × Lack		2 × Kunstseide	
Blanker Draht, mit Auftrag	1,1 mm ∅	Blanker Draht, mit Auftrag	1,5 mm ∅
„ „ ohne „	1,0 mm ∅	„ „ ohne „	1,3 mm ∅
Lack, Baumwolle und Kunstseide			
Blanker Draht, mit Auftrag		1,65 mm ∅	
„ „ ohne „		1,30 mm ∅	

## 3. Seide.

2 × Seide	
Blanker Draht, mit Auftrag	0,57 mm Ø
„ „ ohne „	0,48 mm Ø

1 × Lack, 1 × Seide	
Blanker Draht, mit Auftrag	0,37 mm Ø
„ „ ohne „	0,30 mm Ø

1 × Lack, 2 × Seide	
Blanker Draht, mit Auftrag	0,60 mm Ø
„ „ ohne „	0,50 mm Ø

1 × Lack, 1 × Seide	
Blanker Draht, mit Auftrag	1,15 mm Ø
„ „ ohne „	1,0 mm Ø

## 4. Baumwolle

1 × Baumwolle	
Blanker Draht, mit Auftrag	0,80 mm Ø
„ „ ohne „	0,65 mm Ø

2 × Baumwolle	
Blanker Draht, mit Auftrag	1,35 mm Ø
„ „ ohne „	1,10 mm Ø

3 × Baumwolle	
Blanker Draht, mit Auftrag	0,85 mm Ø
„ „ ohne „	0,60 mm Ø

Lack und Baumwolle	
Blanker Draht, mit Auftrag	1,70 mm Ø
„ „ ohne „	1,40 mm Ø

## 2. Kleinmotorenbau.

1 × Lack, 1 × Kunstseide	
Blanker Draht, mit Auftrag	1,25 mm Ø
„ „ ohne „	1,10 mm Ø

Lack Apyrol	
Blanker Draht, mit Auftrag	1,3 mm Ø
„ „ ohne „	1,0 mm Ø

1 × Lack, 1 × Baumwolle	
Blanker Draht, mit Auftrag	1,5 mm Ø
„ „ ohne „	1,3 mm Ø

Lack Apyrol	
Blanker Draht, mit Auftrag	2,15 mm Ø
„ „ ohne „	1,75 mm Ø

## 3. Großmaschinenbau.

## 1. Seide

1 × Lack, 1 × Seide	
Blanker Draht, mit Auftrag	1,13 mm Ø
„ „ ohne „	1,0 mm Ø

1 × Lack, 2 × Seide	
Blanker Draht, mit Auftrag	1,65 mm Ø
„ „ ohne „	1,50 mm Ø

2 × Seide	
Blanker Draht, mit Auftrag	2,18 mm Ø
„ „ ohne „	2,0 mm Ø

## 2. Kunstseide.

1 × Kunstseide	
Blanker Draht, mit Auftrag	1,33 mm Ø
„ „ ohne „	1,20 mm Ø

2 × Kunstseide	
Blanker Draht, mit Auftrag	2,40 mm Ø
„ „ ohne „	2,20 mm Ø

2 × Kunstseide	
Blanker Draht, mit Auftrag	3,5 mm Ø
„ „ ohne „	3,2 mm Ø

1 × Seide, 1 × Baumwolle	
Blanker Draht, mit Auftrag	2,85 × 3,3 mm ▢
„ „ ohne „	2,50 × 3,0 mm ▢

## 3. Baumwolle.

1 × Baumwolle		2 × Baumwolle	
Blanker Draht, mit Auftrag	2,05 mm Ø	Blanker Draht, mit Auftrag	2,25 mm Ø
„ „ ohne „	1,90 mm Ø	„ „ ohne „	2,0 mm Ø

2 × Baumwolle	
Blanker Draht, mit Auftrag	3,0 × 4,15 mm ▢
„ „ ohne „	2,65 × 3,8 mm ▢

1 × Lack und 2 × Baumwolle	1 × Lack, 2 × Baumwolle
Blanker Draht, mit Auftrag 2,10mm ∅	Blanker Draht, mit Auftrag 2,30mm ∅
„ „ ohne „ 1,80mm ∅	„ „ ohne „ 1,90mm ∅

1 × Lack, 1 × Baumwolle
Blanker Draht, mit Auftrag 2,30mm ∅
„ „ ohne „ 2,10mm ∅

## 4. Apyrol-Isolierung.

Apyrol	Apyrol
Blanker Draht, mit Auftrag 2,20mm ∅	Blanker Draht, mit Auftrag 3,55 × 3,6mm ∅
„ „ ohne „ 1,85mm ∅	„ „ ohne „ 3,2 × 3,2mm ∅

Apyrol
Blanker Draht, mit Auftrag 3,7 × 6,85 mm Litze
„ „ ohne „ 3,2 × 6,2 mm Litze

Lack-Apyrol	Lack-Apyrol
Blanker Draht, mit Auftrag 2,60mm ∅	Blanker Draht, mit Auftrag 2,4 × 3,9mm ∅
„ „ ohne „ 2,20mm ∅	„ „ ohne „ 2,0 × 3,5mm ∅

## Baumwoll-Umklöppelung.

Litze 1 × umklöppelt
Blanker Draht, mit Auftrag 7,70 × 12,9mm ▢
„ „ ohne „ 6,85 × 12,2mm ▢

1 × umklöppelt
Blanker Draht, mit Auftrag 3,7 × 5,45mm ▢
„ „ ohne „ 3,2 × 4,9 mm ▢

Wir lernen hier die in der Technik gebräuchlichen Isolationsanwendungen mit Angabe des Isolationsauftrages bei Runddrähten, Vierkantdrähten und Litzen kennen; wir sehen ferner den Unterschied der Umspinnung, der Umklöppelung, der Umbänderung und der einfachen Lackierung.

Forderungen für die Verwendung eines Stoffes für die Drahtisolierung sind neben der für die Hauptgruppierung als charakteristisch herangezogenen Wärmebeständigkeit:

1. möglichst geringer Isolationsauftrag;
2. hohe Durchschlagfestigkeit;
3. gute mechanische Festigkeit;
4. Beständigkeit gegen Feuchtigkeit und den Einfluß sonstiger Angriffe aus der Luft.

Eine Drahtisolierung ist um so hochwertiger, je geringer der Isolationsauftrag bei höchster elektrischer und mechanischer Festigkeit ist. Die geringsten Isolationsaufträge werden erreicht bei Lackdrähten und bei mit Naturseide (Kunstseide) umspinnenen Drähten, wie dies die folgende Zahlentafel 12 an Beispielen zeigt.

Diese Isolierung ist jedoch nur bei kleinem Drahtdurchmesser anwendbar, da bei größeren Querschnitten die Gefahr besteht, daß z. B. die Seidenisolation mechanisch beschädigt wird, so daß dann die Durchschlagfestigkeit nicht mehr gesichert ist. Ein Mittel zur Verhinderung der Isolationsverschiebung ist das Festkleben der Isolationssschicht auf dem Leiter.

Zahlentafel 12.

Isolierung	Drahtdurchmesser in mm	
	blank	isoliert
1 × Lack . .	0,1	0,12
	1,0	1,06
1 × Seide .	0,1	0,135
	1,0	1,04

Zur Erreichung einer größeren mechanischen Festigkeit, z. B. bei größeren Drahtquerschnitten, wird Baumwolle verwendet.

Zweifache oder selbst mehrfache Bessinnung steigert die Festigkeit, natürlich auf Kosten des Füllfaktors, für dessen Anstieg die folgende Zahlentafel 13 einen Anhaltspunkt gibt.

Zahlentafel 13.

Isolierung	Drahtdurchmesser	
	blank	isoliert
1 × Baumwolle.	0,25	0,37
2 × Baumwolle.	0,25	0,47
3 × Baumwolle.	0,25	0,57

Sehr große Querschnitte, bei denen die Isolation mechanisch stark beansprucht wird, werden durch Umklöppelung gesichert. Der Isolationsauftrag steigt natürlich dementsprechend. Es ist also, wie auch aus den Zahlentafeln hervorgeht, nicht zu vermeiden, daß der Isolationsauftrag sich bei zunehmendem Drahtquerschnitt beträchtlich vergrößert.

Durch Tränken der Isolation mit Lacken können die mechanischen Eigenschaften verbessert, die Durchschlagfestigkeit erhöht und die Wasseraufnahme vermindert werden.

Zahlentafel 14.

Isolierung Baumwolle	Drahtdurchmesser	
	blank	isoliert
1 × umspinnen	4 × 4	4,4 × 4,4
1 × umklöppelt	4 × 4	4,65 × 4,65

An Stelle der Baumwolle kann in vielen Fällen bereits auf Kunstseide und Zellwolle zurückgegriffen werden.

Ein typischer Vertreter der Isolation B ist die Apyrolisolation, die unter Verwendung langfaseriger Spinnasbeste hergestellt wird. Zahlentafel 15 gibt ein Beispiel, das kurz erläutert sei.

Zahlentafel 15.

Zustand	Durchschlagspannung in Volt	
	Apyrol-draht	Draht mit Baumwoll-Isolation
Unbeansprucht . . 12 min mit 25 A/mm <sup>2</sup> belastet	726	672
	725	0 (Isolation restlos verkohlt)

Zwei Kupferdrähte, 1 m lang, mit einem Querschnitt von 2 × 3,4 mm und einem Isolationsauftrag von 0,35 mm einseitig, von denen der eine mit Baumwolle, der andere mit Apyrol isoliert ist, wurden durch einen gleichbleibenden Strom von 170 A

(25 A/mm<sup>2</sup>) zwölf Minuten belastet. Der baumwollumspinnene Draht zeigte nunmehr eine Temperatur von 426° C, der apyrolisierte Draht von 378° C. (Hier machen sich die wärmeableitenden Eigenschaften der Asbestisolierung bemerkbar.) Der Durchschlagversuch, an beiden Drähten angestellt bei 20° mit 50 periodigem Wechselstrom und einer Spannungssteigerung von 10 V/s, ergab die Werte der Zahlentafel 15. Die Apyrolisierung zeigt einen weiteren Vorteil dadurch, daß der Isolationsauftrag, auch wenn er kleiner ist als der einer Baumwollumflechtung, gute mechanische und elektrische Eigenschaften besitzt.

Wir sehen also auch hier, daß für die Wahl der erforderlichen Drahtisolation der Konstrukteur eine Anzahl von Mitteln zur Verfügung hat und auf Grund seiner Stoffkenntnis in der Lage sein muß, die zuverlässigste Gestaltung zu treffen.

Im Betriebe selber, sowie bei der Vorbereitung der Fabrikation ist naturgemäß eingehende Laboratoriumskontrolle für jede Drahtisolation unbedingt nötig; z. B. sind sämtliche Drähte zu prüfen

1. bei der Lackisolation auf Isolationsauftrag, Lackbeschaffenheit, Ölbeständigkeit, sowie an einem durchgeführten Wickel hinsichtlich der Dehnung, hinsichtlich der Anzahl der Isolationsfehler; ferner sind zu prüfen die Durchschlagfestigkeit, die Alterung, die Feuersicherheit und das Verhalten gegen chemische Einflüsse, besonders Lösungsmittel;

2. bei Baumwoll-, Seiden-, Papierisolation sind in ähnlicher Weise der Isolationsauftrag, die Beschaffenheit der Isolation festzustellen und die zur Erhöhung der dielektrischen Eigenschaften am besten geeignete Nachbehandlung durch Isolierlacke, Füllmassen usw. zu prüfen und zu berücksichtigen.

Über die Verwendung der Drähte mit verschiedenen Isolierungen, wie sie aus der Zahlentafel 11 ersichtlich sind, ist zu erwähnen, daß reine Lackdrähte hauptsächlich für Anker und Feldspulen der Kleinstmotoren und Ventilatoren Verwendung finden, während größere Gleichstromanker und Drehstromständer Lackdrähte mit einer Baumwoll- bzw. Kunstseidenbespinnung erhalten. Die Anker und Feldspulen für Elektrofahrzeuge benötigen eine stärkere Isolation und werden meistens aus Lackdrähten mit doppelter Baumwollbespinnung hergestellt. Für größere Drehstrom- und Gleichstrommotoren wird bei Drähten mit zweifacher Baumwollbespinnung z. T. eine Kunstseidenbespinnung mit einer Decklage aus Baumwolle oder Zellwolle genommen. Für Feldspulen der Gleichstrommotoren verwendet man schon fast durchweg Drähte mit einfacher oder doppelter Kunstseidenbespinnung. Nur für Anker und Feldspulen der Hochspannungs-Gleichstrommaschinen kommen wegen ihrer geringeren Auftragstärke teilweise noch Naturseidendrähte oder solche mit Lack und Naturseide in Frage, an deren Stelle jedoch bald ebenfalls Kunstseide wird treten können.

Gummiisolierte Drähte werden für Maschinenwicklungen wegen ihrer geringen Wärmewiderstandswerte und der großen Auftragsstärke nicht verwendet. Hingegen finden sie große Verbreitung in Form von gummiisolierten Litzen als Verbindungsleitungen in Maschinen und Apparaten und als Zuleitungen zu elektrischen Geräten. Man benutzt Gummi als Isolation vor allen Dingen, weil der Gummi sehr guten Berührungsschutz gewährleistet, gute mechanische Festigkeit und Biegsamkeit besitzt. Die Gummihülle wird bei diesen Leitungen sowohl im Aderungs-, als auch im Spritzverfahren aufgebracht und dann vulkanisiert. Innerhalb der Maschinen und Apparate werden die Leitungen mit einer Schutzbeflechtung verwendet, während Zuleitungen zu Geräten vielfach als nackte Schlauchleitungen ohne äußere Schutzhülle Anwendung finden.

#### IV. Isolierstoffe für Maschinen und Apparate.

Die Dimensionierung bzw. die Leistung der elektrischen Maschinen ist in erster Linie von der zulässigen Höchsttemperatur der Isolierung abhängig. Es ist Ziel des Elektromaschinenbaues, die Gewichte der Ma-

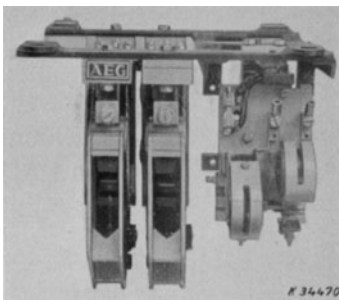


Abb. 169. Schütz. Links ältere Konstruktion, rechts neuere Konstruktion.

schinen für eine gegebene Leistung möglichst herabzusetzen, um auf diesem Wege eine bessere Ausnutzung und eine Gewichtsverminderung des Maschinenparks zu erreichen. Neben der in der Praxis veränderlichen Belastung und Erwärmung ist auch stets mit einer wechselnden mechanischen Beanspruchung zu rechnen, die besonders auch im Hinblick darauf, daß die Wärmedehnungszahlen der Isolierstoffe von denen der elektrischen Leiter verschieden sind, stark zu beachten ist<sup>1</sup>.

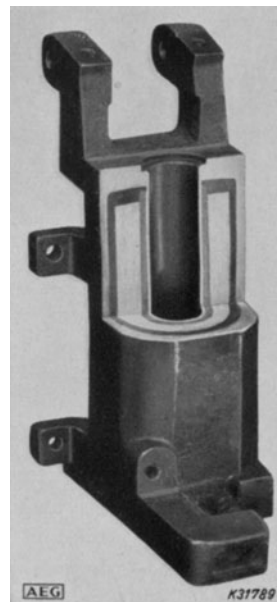


Abb. 170. Schnitt durch Schütz.

<sup>1</sup> Thum, A; ETZ Bd. 58 (1937) S. 134.

Auch die Feuchtigkeitsempfindlichkeit des größten Teiles der Isolierstoffe einschließlich der Lackisolierung ist zu berücksichtigen.

Wie bereits im Vorstehenden angeführt, sind die Glimmerfabrikate hinsichtlich der Isolationseigenschaften und der Wärmebeständigkeit bisher unübertroffen. Durch geeignete Anordnungen von Glimmer mit Geweben und Lacken ist es möglich, die Beanspruchung der Maschinen zu steigern und auf der anderen Seite den Aufbau der Maschinen zu verkleinern. Auch durch zweckentsprechende Anwendung anderer Isolierstoffe wie Hartpapier, Preßmaterial, Holz, Asbestgewebe, Vulkanfaser und der keramischen Isolierstoffe ist es dem geschickten Konstrukteur möglich, weitere Erfolge auszuarbeiten.

Abb. 169 u. 170 zeigen Schütze alter und neuer Konstruktion, bei denen zu erkennen ist, wie durch zweckmäßige Anwendung der Isolierstoffe eine bedeutende Verringerung der Masse möglich wird.

Abb. 171 gibt einen Schnitt durch die Magnetspule einer Schienenbremse wieder; Abb. 172 eine Schienenbremse, bei der der Raum zur Aufnahme der Quarzvergußmasse zu erkennen ist. Durch die Anwendung der wärmeableitenden Quarzvergußmasse sind große technische Vorteile zu erreichen. Eine typische Anwendungsweise des Funkenlöschmaterials, den Funkenchutz eines Fahr Schalters, hergestellt aus Asbestschiefer, läßt Abb. 173 erkennen.

Im Bereich der elektrischen Motoren ist der Kollektorbau beachtenswert und hierbei die Verwendung von Kollektormikanit, der je nach seiner thermischen Beanspruchung unter Verwendung von Naturschellack oder von synthetischen Alkydharzen hergestellt wird.

Die Hartpapierisolierung von Bürstenbolzen besitzt eine größere Wärmebeständigkeit als die Eisengummiisolierung und wird hauptsächlich für geschlossene Maschinen verwendet. Allerdings muß die Hart-

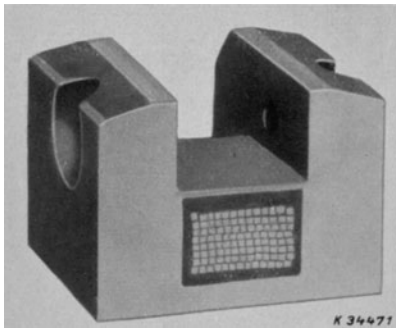


Abb. 171. Schnitt durch die Magnetspule einer Schienenbremse.

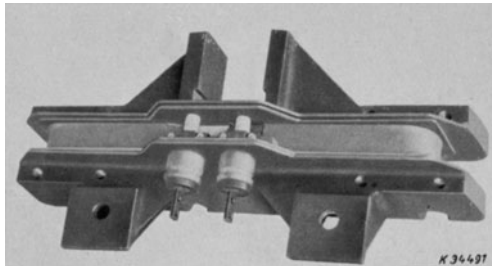


Abb. 172. Schienenbremse mit Raum für Quarzvergußmasse.

papieroberfläche zur Verhinderung von Kriechwegen stets mit einem kriechwegsicheren Lacküberzug versehen sein. Ebenso wird bei Klemmbrettern außer Porzellan und Preßmasse z. T. Hartpapier verwendet, wobei ebenfalls ein Oberflächenschutz durchgeführt wird.

Als Nutenauskleidung dient für Niederspannung meistens geölter oder lackierter Preßspan; bei Maschinen für feuchte Räume verwendet man Preßspan mit einer Mikaniteinlage. Als Nutenkeile verwendet man hauptsächlich unter Vakuum in Öl oder Isolierlack getränkte

Weißbuche, in besonderen Fällen jedoch auch Hartpapier und Hartgewebe. Für Maschinen, welche ausschließlich eine Isolation der Wärmebeständigkeitsklasse B erhalten, werden Nutenkeile aus Asbesthartgewebe mit Kunstharzbindung hergestellt. Ebenso wie die Nutenkeile werden auch Abstützungen für die Wickelköpfe z. T. aus imprägniertem Holz, aber auch aus Hartpapier oder Hartgewebe und in besonderen Fällen aus Porzellan gefertigt (vgl. Abb. 138 S. 177).

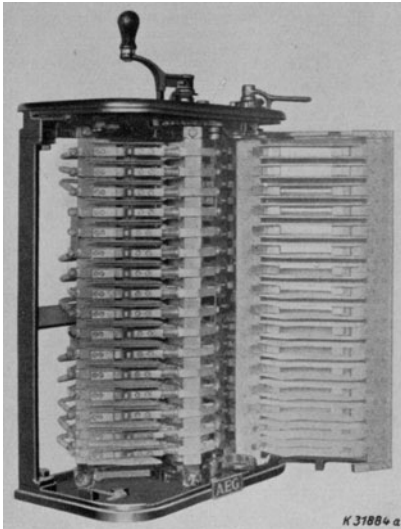


Abb. 173. Fahrshalter.

Zum Isolieren der Dynamo-bleche diente früher hauptsächlich Papier, das heute durch asphalt- oder ölhaltige Lacke ersetzt wird. Diese werden bei Temperaturen bis  $400^{\circ}$  auf die fertig bearbeiteten Bleche aufgebrannt. Ferner ersetzt man die vorgenannten Lacke durch einen gefüllten oder ungefüllten Wasserglasauftrag, die sog. DRENGENBURG-Isolation.

Auf die vielen Isoliermethoden, welche bei der Herstellung der Anker- und Feldwicklungen für Gleich- und Wechselstrommaschinen angewendet werden, näher einzugehen, würde zu weit führen.

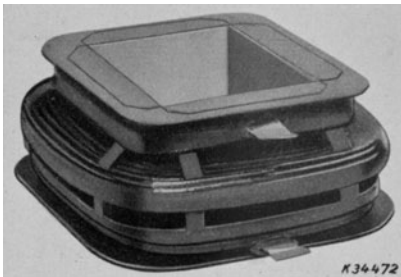


Abb. 174. Feldspule auf Kasten gewickelt.

Eine Anzahl der Ausführungsarten sind jedoch aus den folgenden Abbildungen ersichtlich. Wir sehen eine Feldspule, auf Metallkasten gewickelt (Abb. 174) für eine Gleichstrommaschine; ebenso eine frei-



gewickelte Feldspule (Abb. 175), aus Runddraht hergestellt, und eine aus Flachkupfer gewickelte Hilfsfeldspule (Abb. 176).

Bei Induktorspulen für Synchronmaschinen sind die einzelnen Wicklungslagen durch eine sog. Zementierung fest miteinander verbunden, so daß eine Verformung der Spule selbst bei hoher Umfangsgeschwindigkeit nicht mehr auftreten kann. Statospulen sind z.T. aus mit Kunstseide isoliertem Draht und aus Apyroldraht hergestellt.

Auch die Rotorstäbe für Drehstromanker erhalten teils Mikabandisolation, teils Apyrolisolation und werden auch schon mit Papierband isoliert. Die neuerdings aus Kunstseide hergestellten Isolierbänder sind bei entsprechender Lackbehandlung den Baumwollbändern insofern überlegen, als sie bei geringerer Auftragsstärke eine bedeutend höhere Durchschlagfestigkeit aufweisen. Compoundierte, d. h. mit Asphaltmasse gefüllte Feldspulen zeigen, daß die mit Kunstseide isolierten Drähte die bei dieser Behandlung auftretenden Temperaturen von ca.  $180^{\circ}$  ohne weiteres aushalten.

Feldspulen für Ventilatoren erhalten Geaphan als Außenisolation. Auch die Apyroldrähte und Lack-Apyroldrähte von  $0,3\text{ mm } \varnothing$  aufwärts finden bereits bei Kleinmotoren Anwendung.

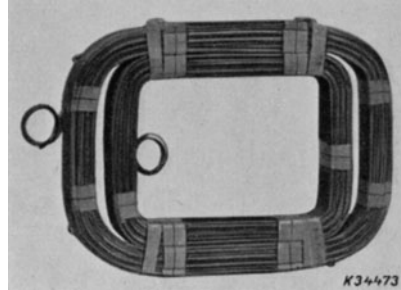


Abb. 175. Feldspule, freigewickelt.



Abb. 176. Hilfsfeldspule aus Flachkupfer.

# Isolierstoffe in der Fernmeldetechnik.

Von K. FRANZ, Berlin.

Bei dem großen Umfang, den das Gesamtgebiet der Fernmeldetechnik hat, und bei dem für die folgenden Ausführungen gegebenen Rahmen ist es notwendig, eine gewisse Beschränkung des Stoffes vorzunehmen. Es sollen daher alle Fragen des Leitungsbaues für Fernmeldeanlagen, also Freileitungen, Kabel und Pupinisierung aus den Betrachtungen ausgeschlossen und nur Isolierstoff-Fragen des Fernmeldegerätebaus behandelt werden.

Aufgabenstellung, Arbeitsweise und Beurteilungsmaßstäbe sind auf diesem Sondergebiet so abweichend gegenüber allen Zweigen der Starkstromtechnik, daß sich hieraus auch weitgehende Unterschiede in der Bewertung und Verwendung der Isolierstoffe ergeben. Diese Unterschiede sind bedingt:

1. durch andersgeartete elektrische Anforderungen, die einmal aus der Benutzung niedriger Spannungen, zum anderen aus der Anwendung hochfrequenter Schwingungen folgen;

2. sie sind weiter bedingt durch die Tatsache, daß es sich in der Fernmeldetechnik überwiegend um Massenerzeugung handelt, wodurch sich vordringliche Forderungen in bezug auf bequeme und billige Verarbeitbarkeit der Isolierstoffe ergeben;

3. und schließlich ist zu berücksichtigen, daß die Fernmeldetechnik nach Art ihrer Erzeugnisse und ihrer Fertigungsverfahren der Feinwerktechnik angehört, so daß die in diesem Zweige üblichen Forderungen an Oberflächengüte und Maßhaltigkeit Berücksichtigung finden müssen.

Die niedrigen Spannungen, mit denen man es im allgemeinen in der Fernmeldetechnik zu tun hat, führen zunächst dazu, daß — von einigen Sonderfällen abgesehen — der Durchschlagfestigkeit der Isolierstoffe nur bedingte Bedeutung zukommt. Damit entfällt das Interesse an dem für die Starkstromtechnik so wertvollen Porzellan. Auch die am Porzellan geschätzte Eigenschaft der witterungsbeständigen Isolation ist nicht von besonderer Bedeutung, da die Fernmeldegeräte

meist in geschlossenen Räumen benutzt werden oder andernfalls in sorgsam konstruierte wasser- oder gar gasdichte Gehäuse eingebaut werden. Der Fernmeldetechniker sieht am Porzellan eigentlich nur seine ungünstige Eigenschaft, daß die starke Schwindung beim Brennprozeß unzulässige Maßabweichungen verursacht, die nur durch teures Schleifen zu beheben sind. Da der Schwachstromtechniker kaum mit Spannungsüberschlägen zu rechnen hat, kommt auch der Frage der Kriechstromfestigkeit nur eine geringe Bedeutung zu. Er verwendet daher im Gerätebau das Porzellan nur in wenigen und ziemlich untergeordneten Fällen.

Mit der zunehmenden Ausbreitung der Hochfrequenztechnik hat sich dagegen in wachsendem Maße die Aufmerksamkeit dem dielektrischen Verhalten der Isolierstoffe zugewandt. Wie berechtigt dies ist, läßt sich am deutlichsten an Hand der bekannten Gleichung für die Verlustleistung eines Kondensators ablesen:

$$N = U^2 \cdot \omega \cdot \operatorname{tg} \delta \cdot \varepsilon \cdot C_0 .$$

Hierin bedeuten  $U$  die Spannung,  $\omega$  die Kreisfrequenz,  $\operatorname{tg} \delta$  den dielektrischen Verlustwinkel,  $\varepsilon$  die Dielektrizitätskonstante und  $C_0$  die Kapazität des Gebildes in Luft, also für  $\varepsilon = 1$ .  $U$  und  $\omega$  sind durch die elektrischen Bedingungen, unter denen das betreffende Gerät zu arbeiten hat, gegeben. Je mehr diese Werte wachsen, um so stärker muß die Forderung erhoben werden, durch Kleinhalten der übrigen Faktoren einen Ausgleich zu schaffen.

Man muß nun zwei Hauptanwendungen der Isolierstoffe unterscheiden: entweder sie dienen als Dielektrikum zum Aufbau von Kondensatoren oder nur als isolierende Träger für hochfrequenzführende Teile. Im ersten Falle ist auch die Kapazität  $\varepsilon \cdot C_0$  als gegeben anzusehen; man wird aber aus Gründen der Raumersparnis danach trachten, in diesem Produkt  $C_0$  so klein wie möglich zu halten, d. h. also umgekehrt einen Isolierstoff zu verwenden, der eine möglichst hohe Dielektrizitätskonstante besitzt. Für den Verlustwinkel muß dagegen der kleinstmögliche Wert gefordert werden, da er ja jetzt den einzigen Faktor darstellt, durch den die Verlustleistung noch beeinflußt werden kann. Anders liegen die Verhältnisse, wenn der Isolierstoff nur als Träger für spannungsführende Teile dient. Man kann dann zunächst durch konstruktive Maßnahmen dafür sorgen, daß  $C_0$  niedrig gehalten wird, an den Isolierstoff wird man aber jetzt die Forderung stellen, daß sowohl  $\operatorname{tg} \delta$  wie auch  $\varepsilon$  möglichst klein sind. Da die Frequenz in die Gleichung eingeht, wird die Forderung nach verlustarmen Isolierstoffen um so vordringlicher, je höher die Schwingungszahlen liegen; die Kurzwellentechnik stellt demnach in dieser Beziehung die höchsten Anforderungen an die Güte der Isolierstoffe.

Die Spannung ist nun auf der Sender- und Empfängerseite sehr verschieden. Bei den Sendern beträgt sie einige tausend Volt. Die Verlustleistung in dem Isoliermaterial kann also beträchtlich werden, und es ist nicht so sehr der Leistungsverlust an sich, wie die durch ihn bewirkte unzulässige Erwärmung und damit beginnende Leitfähigkeit des Isolators zu befürchten. Als Beispiel möge folgender Fall dienen (Abb. 177). In



Abb. 177. Calitsockel für einen Vakuumumschalter.

einem im Vakuum arbeitenden Umschalter wird als Kontaktträger eine kleine Calitsäule benutzt. Der Isolierstoff wird mit der vollen Sendespannung beansprucht, der Abfluß der entwickelten Verlustwärme ist aber denkbar ungünstig, da abgesehen von dem geringen Wärmeabfluß durch den Fuß der Vakuumröhre nur durch Strahlung Wärme abgegeben werden kann. Es zeigte sich nun bei einer Fertigungsreihe plötzlich, daß die kleine Calitsäule in kurzer Zeit bis zur Rotglut erhitzt wurde. Als Ursache wurde folgendes gefunden. Die kleine Metallkappe muß mit Rücksicht auf unbedingt zuverlässige Befestigung auf der Calitsäule mit Eisen aufgelötet werden. Entsprechend der hohen Schmelztemperatur des Eisens muß dies im Wasserstoffstrom erfolgen. Der verwendete Wasserstoff war nun nicht genügend gereinigt, und als Folge davon hatten sich auf dem Isolierkörper kleinste leitende Partikelchen abgesetzt, die zwar nicht direkt in leitender Verbindung standen, wohl aber eine kapazitive Ableitung mit sehr ungünstigem Verlustwinkel darstellten. Bei der Gleichstrom-Isolationsmessung war dieser Fehler also überhaupt nicht wahrnehmbar, bei der Beanspruchung des Körpers mit Hochfrequenz wirkte er sich aber in der geschilderten, katastrophalen Weise aus.

Auf der Empfängerseite von Hochfrequenz-Nachrichtengeräten sind die Spannungen nur sehr gering, vielfach nur Bruchteile von einem Volt. Schädliche Erwärmungen des Isolierkörpers bleiben also hier ganz außer Betracht; um so bedenklicher ist aber der Leistungsverlust im Hinblick darauf, daß er sofort zu einer Verflachung der Resonanzkurve des Schwingkreises führt, was sich in Verringerung von Trennschärfe und Empfindlichkeit des Gerätes äußert.

Den hier geschilderten Verhältnissen verdanken die neueren keramischen Sondermassen vom Typus Calit und Frequenta ihre zunehmende Bedeutung, erreichen sie doch in ihren dielektrischen Werten schon nahezu die Güte des Glimmers. Dabei haben sich die Hersteller solcher keramischer Massen den nicht immer leicht zu erfüllenden maß-

lichen Forderungen der Fernmeldetechnik in anerkennenswerter Weise angepaßt.

Kommen wir zum zweiten Punkte, so finden wir, daß die Rücksicht auf die Massenfertigung wieder zur Verwendung ganz bestimmter Isolierstoffe führt, nämlich solcher, die sich besonders bequem und damit billig verarbeiten lassen. Stanz- und Preßtechnik sind ausgeprägte Verfahren der Massenfertigung; daraus erklärt sich die umfangreiche Verwendung von Teilen aus Hartpapier und Isolierpreßstoff. Der wirtschaftliche Vorteil gerade des Preßverfahrens ist so einschneidend, daß man in der Fernmeldetechnik die Isolierstoffe in immer größerem Umfange als reine Baustoffe verwendet, also dort, wo ihre Eigenschaft als Isolierstoff gar nicht ausgenutzt wird oder doch nur eine ganz nebensächliche Rolle spielt. Der bekannte Handapparat der modernen Fernsprechstationen brauchte aus elektrischen Gründen durchaus nicht aus Isolierpreßstoff zu bestehen; die notwendige Isolation der Zuleitungsdrähte für Telephon und Mikrophon ließe sich auf andere Weise mit Leichtigkeit erzielen. Entscheidend war nur die Tatsache, daß sich in einem Preßvorgang das Teil herstellen läßt, und daß die weitere Arbeit daran sich nur noch auf die Verbesserung der Oberfläche durch Nachglänzen und das Anschrauben einiger Kontaktfedern beschränkt. Noch deutlicher wird diese Benutzung von Isoliermaterialien als Baustoffe, wenn man die Herstellung von Radiogehäusen aus solchen Stoffen betrachtet; man darf es dabei in der heutigen Zeit als besonderen Vorteil ansehen, daß wertvolles Holz oder gar unter Devisenaufwendungen beschaffte ausländische Furniere gespart werden. Es ist klar, daß derartige Verwendungszwecke höchste Anforderungen an die Oberflächengüte der Preßstoffe stellen. Daher können z. B. die in der Starkstromtechnik wichtigen Isolierpreßstoffe auf Asbestgrundlage nur in seltenen Fällen und nur für Innenteile Verwendung finden.

Hand in Hand mit den Forderungen an Oberflächengüte gehen in der Feinwerktechnik im allgemeinen die Ansprüche sehr hoher Maßgenauigkeit. Die vielfach verwickelte Funktion und die Kleinheit der Fernmeldegeräte bedingen geringe Toleranzen, und diese Forderung muß in gleicher Weise wie an die metallischen Werkstoffe auch an die Isolierstoffe gestellt werden. Die Berechtigung einer solchen Forderung läßt sich am deutlichsten an dem Beispiel eines Kontaktsatzes erhärten (Abb. 178), wie er an jedem Hebdrehwähler angebaut ist. Er besteht aus dreimal zehn Schichten von Kontaktlamellen, die durch Zwischenlagen von Kunstharzhartpapier gegeneinander isoliert sind, während weitere Zwischenlagen aus Aluminiumblechen den notwendigen Abstand geben. Man braucht demnach einschließlich der Deckbleche zum Aufbau eines solchen Kontaktsatzes 30 Messingsegmente, 62 Zwischenlagen aus Hartpapier, 33 Aluminiumplatten und 2 Deckplatten. Mit Rücksicht auf

sicheres Einlaufen der Kontaktarme darf äußerstenfalls eine Toleranz von 0,65 mm für den gesamten Aufbau zugelassen werden. Betrachtet man aber schon allein die Hartpapierzwischenlagen, die aus einem Werkstoff von  $0,5 \pm 0,05$  mm Stärke hergestellt werden, so erreicht man im ungünstigsten Fall bereits  $62 \times 0,05 = 3,10$  mm Abweichung vom Sollmaß. Man kommt also trotz der vergleichsweise hohen Maßhaltigkeit des Hartpapiers ohne ein Aussuchen der Zwischenlagen gar nicht aus. Bei dem riesigen Verbrauch derartiger Zwischenlagen mußte eine Ein-

richtung gebaut werden, die vollautomatisch die Sortierung von 0,01 zu 0,01 mm Stärke ausführt. Durch besondere Vorschriften muß dann die Schichtung der Kon-

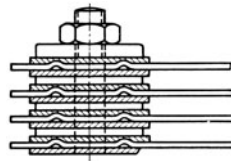
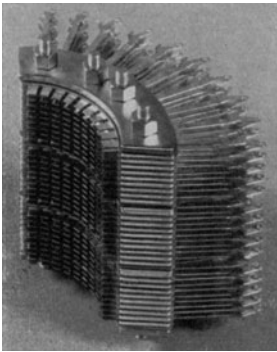


Abb. 178 a und b. Kontaktsatz eines Hebdrehwählers.

taktsätze genau festgelegt werden. Es ist klar, daß die Schwierigkeiten an solchen Stellen ins Ungemessene wachsen würden, wenn nicht die Stärkentoleranz des Werkstoffes auf ein Geringstmaß herabgedrückt wird.

An Hand dieses Beispiels kann auch gleich noch eine weitere Eigenschaft der Isolierstoffe besprochen werden, die für die Fernmeldetechnik von ausschlaggebender Bedeutung ist: die Wasser- bzw. Feuchtigkeitsaufnahme. Der große Einfluß, den die Feuchtigkeit bei hygroskopischen Isolierstoffen auf den Isolationswiderstand ausübt, ist bekannt. Es ist daher in der Fernmeldetechnik üblich, solche Isolierstoffe nach ihrem Verhalten in erhöhter Feuchtigkeit — beispielsweise nach 4 tägiger Lagerung in Luft von 80 % relativer Feuchtigkeit — zu beurteilen. Für Lieferungen, die in die tropischen und subtropischen Gebiete gehen sollen, sind sogar besondere Untersuchungsräume vorgesehen, in denen das Tropenklima bezüglich Luftfeuchtigkeit und Temperatur nachgeahmt wird. Abgesehen von den Veränderungen des Isolationswiderstandes sind hierbei namentlich die maßlichen Änderungen und die etwa an benachbarten Metallteilen verursachten Korrosionen zu beachten. Ein hygroskopischer Werkstoff quillt bei Feuchtigkeitsaufnahme und trocknet bei Wasserabgabe zusammen. Würde man also etwa den vorher er-

wähnten Kontaktsatz mit Zwischenlagen aus der stark hygroskopischen Fiber ausrüsten, so würde, wenn der Zusammenbau bei mittlerer Feuchtigkeit erfolgte, in trockener Luft eine Lockerung des ganzen Gebildes, in Luft von sehr hoher Feuchtigkeit dagegen unter Umständen ein Reißen der Schraubenbolzen zu befürchten sein.

Die wachsende Gefahr von Korrosionen, die ein hygroskopischer Stoff im Gefolge hat, ist auch ohne weiteres einzusehen. Der Stoff saugt sich wie ein Schwamm mit Feuchtigkeit voll und bildet zwischen anliegenden Metallteilen, die verschieden hohes Potential haben, einen Elektrolyten, wodurch insbesondere das an positivem Potential liegende Metall der Zerstörung ausgesetzt ist.

Nachdem so die grundsätzlichen Anforderungen der Fernmeldetechnik an die Isolierstoffe klargestellt sind, sollen die einzelnen Gruppen von Isolierstoffen an Hand von Anwendungsbeispielen besprochen werden.

## A. Natürliche Isolierstoffe.

Von den natürlichen Isolierstoffen ist der Schiefer heute ohne jede Bedeutung, Marmor findet nur in geringem Umfange noch für Schalttafeln Verwendung und auch Asbest wird nur wenig benutzt. In Form eines Asbestgewebes dient er gelegentlich als Träger für Heiz- oder Widerstandswicklungen, in Form von Asbestpappe wird er ab und an benutzt, um die Berührung solcher Wicklungen mit benachbarten Metallteilen, etwa einer Gehäusewand, zu verhindern. Seine Anwendung verdankt er in solchen Fällen nur seiner hohen Wärmebeständigkeit bzw. seiner Unbrennbarkeit. Seine Isolation dagegen ist schlecht und stark feuchtigkeitsabhängig. Eine wesentlich größere Bedeutung kommt dem Glimmer zu. Dank seiner hohen Dielektrizitätskonstante, seiner hohen Durchschlagfestigkeit und der Eigenschaft, daß er sich leicht in dünnste Blättchen aufspalten läßt, ist er ein bevorzugter Baustoff für Festkondensatoren. Es ist möglich, bei Glimmerkondensatoren hohe Kapazitäten auf außerordentlich kleinem Raum unterzubringen. Dazu kommt, daß Glimmer einen sehr geringen und mit der Frequenz nur wenig veränderlichen Verlustwinkel besitzt. Freilich ist, wie bei jedem von der Natur gebotenen Werkstoff auch beim Glimmer die Güte je nach dem Herkunftsort recht verschieden. Die Fernmeldetechnik verwendet grundsätzlich nur Kaliglimmer und bevorzugt den nach seinem rötlichen Schein sog. roten Glimmer, der im allgemeinen einen erheblich kleineren Verlustwinkel besitzt als der grüne Glimmer. Da der Preis des Glimmers mit der Stückgröße stark ansteigt, kommen nur verhältnismäßig kleine Plättchen zur Anwendung. Der in der Starkstromtechnik verwendete Isolierstoff Mikanit, bei dem kleine Glimmerblättchen oder Glimmerabfälle durch Bindung mittels eines Kunst- oder Naturharzes zu Platten

oder einfachen Formteilen verpreßt sind, hat für die Schwachstromtechnik keine Bedeutung. Mikanit befriedigt nicht in der Maßhaltigkeit, hat bei weitem nicht mehr die günstigen Eigenschaften wie Glimmer, ist spröde und läßt leicht kleine Glimmerteilchen abbröckeln, was eine Gefahr für die feinen Kontakte und empfindlichen Schaltmechanismen der Fernmeldegeräte bedeutet. Glimmer findet für die hochwertigsten Präzisions- und Meßkondensatoren Verwendung. Während früher die Metallbeläge durchweg von Zinn- oder Aluminiumfolien gebildet wurden, die auf Wärmeplatten mittels Paraffin aufkaschiert werden, um Verschiebungen zu verhindern, hat sich in neuerer Zeit ein Verfahren eingeführt, Beläge von Edelmetallen durch Einbrennen fest auf der Glimmeroberfläche anzubringen. Es handelt sich dabei um Gold, Silber oder Platin, welche in ätherischen Ölen kolloidal gelöst sind. Diese Lösungen sind unter dem Namen Gold-, Silber- oder Platinkor im Handel; sie werden mittels einer Spritzpistole in dünner Schicht aufgebracht und nach Vortrocknung in Luft einem Brennprozeß bei langsam auf 500—550° C gesteigerter Temperatur unterworfen. Hierbei werden die ätherischen Öle verdampft und es bleibt ein dünner, fest auf dem Glimmer haftender Metallüberzug zurück. Durch dieses Verfahren ist höchste Konstanz der Kapazität gewährleistet. Auch in der Rundfunk-Empfangstechnik benutzt man gern solche „Silberglimmerkondensatoren“. Sie bieten neben der Unveränderlichkeit und der Hochwertigkeit in dielektrischer Beziehung noch den großen Vorteil, daß sie sich leicht auf einen vorgeschriebenen Wert abgleichen lassen. Es können nämlich durch Abkratzen mit einem Stichel bequem einzelne Teile des Metallbelages abgetrennt werden, so daß sie keinen Beitrag mehr zu der Kapazität des Kondensators liefern. Nimmt man also von vornherein eine Glimmerplatte mit zu hoher Kapazität, so kann man durch schrittweises Abtrennen der Belegung allmählich den gewünschten Endwert erreichen. In der Praxis erfolgt dieses Abgleichen so, daß der Kondensator fortlaufend in den Meßzweig einer Wechselstrombrücke eingeschaltet bleibt, so daß man unmittelbar an dem im Nullzweig liegenden Instrument die erzielte Kapazitätsänderung ablesen kann.

## B. Keramische Isolierstoffe.

Die neueren keramischen Werkstoffe haben vielfach mit dem Glimmer den Wettbewerb aufgenommen oder sind ergänzend in solchen Fällen eingetreten, wo der Glimmer mangels geeigneter Formgebungsmöglichkeit ausscheiden mußte. Hier sind zunächst die auf der Basis des Magnesium-Silikates aufgebauten Werkstoffe Calit und Freuenta zu nennen. Sie kommen dem Glimmer, wie erwähnt, bezüglich Verlustwinkel und Dielektrizitätskonstante sehr nahe und haben mit ihm die



Vorteile der Formstarrheit und Unempfindlichkeit gegenüber Feuchtigkeit und Temperatur gemein. Sie sind dem Glimmer insofern überlegen, als man komplizierte Formgebungen verhältnismäßig leicht und notfalls ohne besonderen Aufwand an teuren Werkzeugen bewerkstelligen kann. Es ist dadurch die Möglichkeit gegeben, auch kleinere Stückzahlen noch wirtschaftlich herzustellen; in diesem Punkte sind die keramischen Massen gegenüber den später zu besprechenden Isolierpreßstoffen durchaus im Vorteil. Die Möglichkeit, den Glühprozeß in zwei Abschnitte zu unterteilen und zwischendurch die endgültige Bearbeitung der Teile vorzunehmen, schafft die Vorbedingung für die von der Fernmeldetechnik geforderte Maßhaltigkeit; hierin sind Calit und Freuenta dem Porzellan weit überlegen. In Fällen, wo äußerste Maßgenauigkeit verlangt wird, kann weiterhin durch Rund- oder Flächenschliff eine Toleranz von  $\pm 0,01$  mm gewährleistet werden. Hierdurch ist die Vorbedingung gegeben, Metallteile, beispielsweise Kontaktringe, durch Aufschrupfen fest und dauerhaft auf Calitachsen zu befestigen. Solche Achsen werden im spitzenlosen Schleifverfahren mit höchster Genauigkeit hergestellt. Abb. 179 läßt

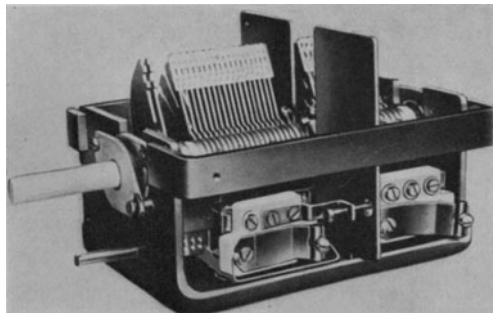


Abb. 179. Zweifach-Drehkondensator für ein Rundfunk-Empfangsgerät. Lagerung des Rotors mit Calitachse; Aufbau der Abgleichkondensatoren auf Calitsockeln.

den Einbau in dem Drehkondensator eines Empfangsgerätes erkennen, während Abb. 180 einen veränderlichen Sendekondensator wiedergibt. Beim Schleifen muß darauf geachtet werden, daß weder die Schleifscheibe noch das Kühlmittel Stoffe enthalten, die beim Auftrocknen die Oberflächenisolation der keramischen Teile herabsetzen. Solche Fälle sind gelegentlich vorgekommen; daß es sich nur um Oberflächenfehler handelte, wurde dadurch bewiesen, daß nach einfachem Abwaschen in reinem Wasser der Isolationswert sprunghaft auf den üblichen Wert stieg. Das zuvor geschilderte Verfahren des Aufbringens eines Metallbelages durch Einbrennen ist auch bei allen keramischen Massen anwendbar. Vorzugsweise kommt hier Silber zur Anwendung; derartige Beläge können, falls erforderlich, auf galvanischem Wege oder durch Aufspritzen von Metall noch weiter verstärkt werden. Wie bei Glimmer ergibt sich demnach auch hier die Möglichkeit, auf einfache Weise Kondensatoren höchster Konstanz herzustellen. Aber auch Selbstinduktionsspulen lassen sich auf geschickte Weise mittels dieses

Verfahrens erzeugen. Auf einem zylindrischen Körper wird beispielsweise eine schraubenförmige Nut von rechteckigem Querschnitt in den keramischen Stoff eingearbeitet, dann wird der gesamte Körper feuerver-silbert und danach durch Überschleifen der Belag auf der Zylinderfläche wieder heruntergearbeitet, so daß er nur in den vertieften Nuten verbleibt und somit die Windungen einer Spule bildet. Auch diese Selbst-induktionen haben gegenüber allen mit Leitungsdrähten hergestellten Spulen den Vorteil absoluter Unveränderlichkeit. In ganz entsprechender Weise werden auch Flachspulen hergestellt. Ein weiterer, gar nicht hoch genug einzuschätzender Vorteil dieser Metallbeläge liegt darin, daß man Anschlüsse an sie unmittelbar anlöten kann. Erst dadurch können diese keramischen Konstruktionsteile voll ausgenutzt werden. Sonst

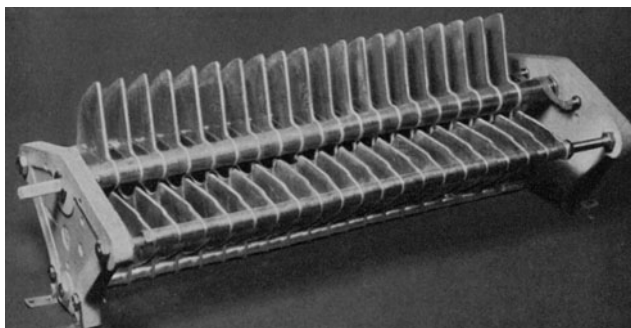


Abb. 180. Hochspannungs-Drehkondensator für einen Sender. Lagerung des Rotors mit Frequentaachse; Aufbau des Stators mit Frequentaplatten.

bliebe nur die Möglichkeit der Verschraubung oder der Vernietung. Die Verschraubung wird aber im allgemeinen zu teuer, und die Anwendung der Nietung erfordert wegen der Sprödigkeit der keramischen Massen große Vorsicht. Biege- und Schlagbiegefestigkeit von Calit und Frequenta sind zwar erheblich höher als bei Porzellan, trotzdem bleiben aber Nietoperationen bei solchen Werkstoffen immer unerwünscht. Wo Verschraubungen angewendet werden, ist stets auf eine sehr saubere, ebene Auflage der keramischen Körper zu achten, da sie praktisch nicht verformbar sind und demnach Brüche bei schlechter Auflage unvermeidlich werden.

Dank den geschilderten günstigen Eigenschaften haben sich die keramischen Sondermassen auf dem Rundfunkgebiet und zumal auf dem Kurzwellengebiet in erstaunlich kurzer Zeit ein weites Feld erobert, auf der Seite der Sendegeräte noch stärker als bei den Empfangsgeräten. Daß bei den Sendern keramische Stoffe sehr erwünscht sind, ist erklärlich, da hier mit höheren Temperaturen gerechnet werden muß und da bei

den hohen Spannungen neben den guten dielektrischen Werten vor allem hohe Durchschlagsfestigkeit und Unempfindlichkeit gegen Glimm- und Sprühentladungen zu fordern ist. Organische Isolierstoffe müssen daher an diesen Stellen von vornherein ausscheiden. Die für Senderzwecke benutzten Hochleistungskondensatoren bauen sich, soweit es sich um Festkapazitäten handelt, aus feuerversilberten Calit- oder Frequenzplatten auf, deren Metall durch Aufspritzen metallisch verstärkt ist. Um vorzeitige Glimm- und Sprühentladungen, sowie Überschläge und Durchschläge zu verhindern, werden diese Platten mit verdicktem oder wulstförmigem Rand versehen. Läßt sich der geforderte Kapazitätswert nicht mit einem solchen Element erreichen, oder soll die Spannungsbelastung für das einzelne Element herabgesetzt werden, so vereint man mehrere Platten in Parallel- oder Serienschaltung in einem Kondensatorblock. Auf der Empfängerseite finden die keramischen Sondermassen vorzugsweise beim Aufbau der Drehkondensatoren, sowie zur Herstellung kleiner Festkondensatoren Verwendung, aber auch andere hochfrequenzführende Teile wie Nockenschalter, Röhrensockel u. dgl. werden aus ihnen hergestellt. Aus der Fülle der Anwendungsbeispiele soll willkürlich

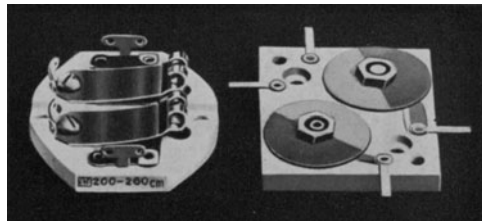


Abb. 181. Trimmerkondensatoren auf Calitsockeln.  
Links: Quetschtrimmer; rechts: Scheibentrimmer.

ein Bild herausgegriffen werden, welches den Aufbau von kleinen Trimmerkondensatoren zeigt, wie sie zum genauen Abgleich von Hochfrequenzkreisen benutzt werden (Abb. 181). Bei dem Aufbau kleiner Festkondensatoren benutzt man mit Vorteil die rutilhaltigen Sondermassen Kerafar oder Condensa, bei denen Dielektrizitätskonstanten von 40 bis 80 erreicht werden, allerdings auf Kosten des Verlustwinkels. Übrigens darf nicht übersehen werden, daß diese im Vergleich zum Glimmer sehr hohen Dielektrizitätskonstanten wieder dadurch ausgeglichen werden, daß sich die keramischen Stoffe bei weitem nicht in so dünnen Schichten herstellen lassen, wie dies infolge der hervorragenden Spaltbarkeit bei Glimmer möglich ist.

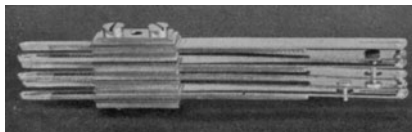
Schließlich muß noch auf die Verwendung der keramischen Massen mit kleinem Wärmeausdehnungskoeffizienten kurz hingewiesen werden. Diese Stoffe, die unter den Namen Sipa und Ardostan bekannt sind, werden beim Aufbau von Kurzwellensendern benutzt, wenn allerhöchste Ansprüche an Frequenzunveränderlichkeit gestellt werden. Sie bilden dann auf dem Isolierstoffgebiet das Gegenstück zu den 36 proz.

Nickelstählen, den sog. Invarstählen, die in die gleichen Geräte eingebaut werden.

### C. Gummihaltige Isolierstoffe.

Auf dem Gebiet der gummihaltigen Isolierstoffe hat der Weichgummi als Hüllmaterial für metallische Leiter seine Stellung noch behauptet. Allerdings finden gummiisolierte Leitungen innerhalb der Fernmeldegeräte nur geringe Anwendung; sie verbrauchen verhältnismäßig zu viel Raum und das Abisolieren an den Anschlußstellen ist unbequem. Man benutzt sie vorzugsweise für die Verdrahtung von Geräten, die im Grubenbetrieb arbeiten, wo natürlich die Unempfindlichkeit der Gummiisolation gegenüber Feuchtigkeit ausschlaggebend ist. In diesem Sondergebiet werden auch Weichgummischläuche für die Isolation von Spulenkernen gern angewendet.

Der Hartgummi, der in früheren Jahren der bevorzugte Isolierstoff des Schwachstromtechnikers war, hat dagegen seine Bedeutung fast völlig eingebüßt. Er ist durch die Hartpapiere und die Isolierpreßstoffe verdrängt worden und hat sich nur für einige Sonderzwecke zu halten vermocht. Noch heute wird er zur Herstellung der sog. Quellpimpel an Kontaktfedern verwendet (Abb. 182 a). Bei Kon-



Quellgummi

Abb. 182 a. Hartgummipimpel  
in Relais-Federsätzen.

taktfedersätzen muß häufig die Kontaktbewegung von einer Feder auf die benachbarte durch ein Isolierzwischenstück übertragen werden. Die Befestigung dieses Isolierzwischenstücks soll einfach, billig und raumsparend sein. Hierfür bietet der Hartgummi durch seine Quellfähigkeit eine wirklich elegante Lösung. Erwärmt man nämlich eine Hartgummistange in heißem Wasser, so kann man sie leicht durch ein Zieheisen auf einen um etwa 15 bis 20 % kleineren Durchmesser herunterziehen. Schreckt man sie unmittelbar nach dem Verlassen des Zieheisens in kaltem Wasser ab, so behält sie zunächst ihre neue Form, also den verringerten Durchmesser, bei. Jetzt schneidet man die Pimpel in der erforderlichen Länge ab und führt sie in die Lochung der Kontaktfedern ein. Diese sind im Durchmesser so gehalten, daß die Hartgummipimpel sich gerade stramm einfügen lassen. Bei der Erwärmung der Kontaktfeder auf einer Wärmeplatte quillt der Gummi wieder auf, sucht seine alte Form wiederzugewinnen und wird dadurch unverrückbar und zuverlässig in der Kontaktfeder befestigt. Durch mehrstündiges Nachquellen in einem Wärmofen sorgt man dafür, daß die Quellung des Hartgummis vollkommen beendet wird, damit nicht etwa später, nach genauer Abgleichung der Pimpelhöhe noch weitere

Maßänderungen auftreten, die natürlich die Federjustierung ändern würden.

Eine zweite Verwendungsstelle, an der sich der Hartgummi bis heute behauptet hat, ist die Isolation von Schraubendurchführungen durch Kontaktfedersätze (Abb. 182 b). Hier muß verhindert werden, daß durch Verschiebung einer Feder oder eines Anschlußbleches, sowie durch Berührung eines Metallspänchens, welches etwa von dem Stanzgrat her-  
rühren könnte, auf dem Wege über den Schraubenbolzen Schluß entstehen kann. Konstruktiv wird dieses Ziel durch ein kurzes Isolierröhrchen aus Hartgummi erreicht, welches über den Schraubenbolzen geschoben wird.

Neue Anwendungsmöglichkeiten sind dem Hartgummi in jüngster Zeit mit dem durch Reichspatent geschützten „Dartex-Verfahren“ erschlossen

worden. Hierbei wird entsprechend vorbereitete Kautschuklösung mit einer Spritzpistole, wie man sie in der Lackiertechnik allgemein benutzt, auf die mit Hartgummi zu bedeckenden Gegenstände aufgespritzt. Bei einem Spritzvorgang wird eine etwa 0,2 mm starke Schicht aufgetragen; dieses Spritzen kann aber nach Zwischentrocknung in Luft mehrfach wiederholt werden. Zur Erzielung einer gleichmäßigen Verteilung und Vermeidung von Tropfenbildungen müssen die Teile während des Spritzens und Trocknens eine langsame Drehbewegung ausführen. Schließlich werden die Teile wie üblich vulkanisiert. Wieweit sich dieses Verfahren durchsetzen können, ist noch nicht zu beurteilen. Zur Zeit ist die Anwendungsmöglichkeit aus wirtschaftlichen Gründen beschränkt, da sich der gleiche Endzweck auf manche andere und billigere Weise erreichen läßt.

Die beiden Hauptgebiete, aus denen die Fernmeldetechnik heute ihre Isolierstoffe entnimmt, sind die geschichteten Isolierstoffe und die Isolierpreßstoffe.

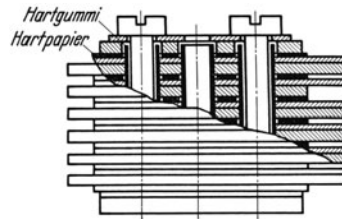


Abb. 182 b. Isolierung von Schraubendurchführungen mit Hartgummiröhrchen.

#### D. Geschichtete Isolierstoffe.

Bei den geschichteten Isolierstoffen, die in Form von Platten zur Verwendung kommen, ist das Kennzeichnende die Verarbeitung durch Ausschneiden und Lochen. Die Bearbeitung dieser Stoffe durch spanabhebende Verformung, vorzugsweise Fräsen, tritt demgegenüber ganz zurück. Das kommt deutlich zum Ausdruck, wenn man einmal gegenüberstellt, wie sich der Gesamtverbrauch eines großen Werkes der Fernmeldetechnik an Hartpapieren auf die verschiedenen Materialstärken

verteilt (Abb. 183). Die Möglichkeit des Verstanzens ist bis zu Stärken von 3 mm, unter Verwendung besonders ausgestalteter Werkzeuge sogar bis zu Stärken von 4 mm gegeben. Man sieht, daß sich der Gesamtverbrauch

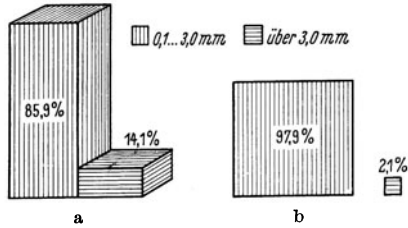


Abb. 183. Verbrauch von Kunstharz-Hartpapier in der Fernmeldetechnik. Die Darstellung zeigt, daß der Hauptverbrauch bei den stanzbaren Platten bis 3 mm Stärke liegt; der Anteil der stärkeren Abmessungen, die spanabhebend bearbeitet werden müssen, ist demgegenüber gering.

Als Maßstab diente bei a das Volumen, bei b die Fläche.

in kg zu 85% auf diese kleineren Abmessungen verteilt. Dabei ist noch zu berücksichtigen, daß der Vergleich dem Gewichte nach irreführend ist. Zieht man den Vergleich, was richtiger ist, der Fläche nach, so wird noch augenfälliger, wie ausschlaggebend für die Verwendung dieser Werkstoffe ihre Verarbeitung durch Stanzen ist.

Das Gebiet wird gänzlich beherrscht von den Kunstharzhart-

papieren, die im Zuge der Entwicklung die Fiber und die Elektropappen, wie Preßspan, Anelektron u. dgl., vollständig verdrängt haben. Die Ursache hierfür war die geringere Feuchtigkeitsaufnahme des Hartpapiers. Fiber und die genannten Elektropappen sind außerordentlich hygroskopisch; ihr Isolationswiderstand ist daher in stärkstem Maße von dem Feuchtigkeitsgehalt der Luft abhängig, ihre Maßbeständigkeit ist unbefriedigend und sie bringen hohe Korrosionsgefahr für benachbarte Metallteile. Für Fiber ist diese letzte Gefahr besonders groß, wenn die bei der Herstellung angewendete Chlorzinklösung nicht restlos ausgelaugt ist.

Auch die Hartpapiere enthalten ihrem Aufbau nach hygroskopische Stoffe, nämlich die Papierbahnen, aus denen sie geschichtet sind. Es ist daher klar, daß die Feuchtigkeitsaufnahme eines Hartpapiers um so weiter heruntergedrückt werden kann, je höher man den Harzanteil bei der Herstellung wählt. Dieser Überlegung verdanken die sog. Super-Hartpapiere, die jetzt nahezu ausschließlich in der Fernsprechtechnik benutzt werden, ihre Entwicklung und schnelle Verbreitung. Die Wasseraufnahme dieser Super-Hartpapiere ist nur etwa halb so groß wie bei den gewöhnlichen Hartpapieren, und dementsprechend bleibt ihr Isolationswiderstand bei gleichen Feuchtigkeitsverhältnissen erheblich höher als bei jenen. Die Deutsche Reichspost schreibt z. B. nach 4 tägiger Lagerung in 80% feuchter Luft für gewöhnliche Hartpapiere der Klasse III 1000 Megohm vor, während die Super-Hartpapiere mindestens 5000 Megohm erreichen müssen. Die höhere Feuchtigkeitsaufnahme führte vor mehreren Jahren bei dem damals allein benutzten Hartpapier Klasse III zu recht störenden Korrosionen an Neusilberfedern. Das in der Fernsprechtechnik in großen Stückzahlen verwendete Flachrelais (Abb. 184) ist so aufgebaut, daß die Neusilberfedern der Kontaktfedersätze sich mit an-

gebogenen Lappen auf die Schnittfläche der Spulenseitenscheibe aufstützen. Da diese Federn teilweise Potentialunterschiede von 60 V haben, kam es zu elektrolytischen Zersetzungen und als Folge davon zu Korrosionen an den Stützlapfen. In besonders schlimmen Fällen führte dies zum Schluß benachbarter Federn. Durch die Verwendung des harzreicheren Super-Hartpapiers konnten diese Fehler mit Sicherheit abgestellt werden. Für einwandfrei hergestellte Super-Hartpapiere kann dies auf Grund eingehender Versuche zuverlässig behauptet werden, und es müssen daher die von einigen Seiten auch gegen die Super-Hartpapiere noch erhobenen Bedenken als unbegründet gelten. Immerhin werden aus solchen Bedenken heraus jetzt teilweise die Brücken, die bei der Ankerbetätigung die Relaisfedern anheben, aus Preßstoff Typ O, statt bisher aus Super-Hartpapier hergestellt. Dauerversuche bei sehr hohen Feuchtigkeiten haben aber gezeigt, daß an solchen Preßstoffbrücken mindestens die gleichen Korrosionen auftreten können wie an Hartpapier. Es kann angenommen werden, daß diese Erscheinung nur auf den Feuchtigkeitsfilm zurückzuführen ist, der sich bei Taupunktsüberschreitung auf der Oberfläche jedweden Werkstoffs absetzt. Dafür spricht, daß Ver-

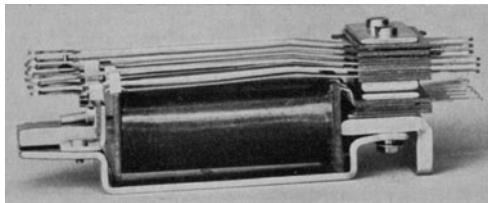


Abb. 184. Flachrelais für Fernsprechanlagen.

gleichsversuche mit absolut unhygroskopischen Stoffen, wie Porzellan, Calit und Glas, genau dasselbe Ergebnis zeigten. Die konstruktive Verwendung des Hartpapiers im Flachrelais ist allerdings insofern als ungünstig anzusprechen, als gerade die Schnittkante des Werkstoffes, die natürlich vorzugsweise zur Feuchtigkeitsaufnahme neigt, zur Wirkung kommt. Man wird daher diese Kante nicht so rauß lassen dürfen, wie sie sich durch den Stanzvorgang ergibt, sondern unbedingt durch Überfräsen eine glatte und einwandfreie Fläche schaffen. Diese Nacharbeit der Schnittkante ist aber auch aus Rücksichten der Federjustierung nicht zu umgehen. Als weiteres Mittel, die Schnittfläche weniger feuchtigkeitsempfindlich zu machen, wird ihre Lackierung mit Kunstharzlack empfohlen. Derartige Lacküberzüge sind aber erfahrungsgemäß auf die Dauer für Feuchtigkeit durchlässig; sie können demnach bei kurzzeitiger Einwirkung von hohen Feuchtigkeiten einen gewissen Schutz bieten, bei andauernd hoher Feuchtigkeit versagen sie auch.

Bei allen Hartpapieren muß durch nicht vollständige Aushärtung darauf hingearbeitet werden, daß ausreichende Stanzbarkeit gewährleistet ist. Das Schneiden von Hartpapier kann auch nur in ange-

wärmtem Zustande erfolgen. Die Platten bzw. Stanzstreifen werden in Vorwärmöfen auf etwa 120° C erwärmt, ehe sie der Exzenterpresse zugeführt werden. Da Hartpapier schlechte Wärmeleitfähigkeit besitzt, ist die Einhaltung einer angemessenen Anwärmzeit erforderlich, andererseits wird mit wachsender Zeit das Material immer weiter ausbakelisiert, so daß es schließlich immer schlechter zu verarbeiten ist. Dabei ist noch zu bedenken, daß das Material immer mehrere Arbeitsgänge durchzumachen hat, nämlich Streifenschneiden, Ausschneiden der Teile, evtl. Lochen und noch Sonderoperationen im Zusammenbau, so daß sich schließlich in der Summe eine recht erhebliche Anwärmzeit ergibt. Aus diesem Grunde muß darauf geachtet werden, daß keinesfalls während der Betriebspausen das Hartpapier unnötigerweise im Wärmofen verbleibt, und daß dem Wärmofen stets der Streifen entnommen wird, der bereits die längste Zeit gewärmt wurde. Aus betrieblichen Rücksichten ist demnach unbedingt solchen Einrichtungen der Vorzug zu geben, bei denen der Werkstoff vor dem Einführen in die Presse im Durchlauf erwärmt wird. Da die Erhöhung der Temperatur sich in gleicher Weise auswirkt wie die Verlängerung der Wärmzeit, sind dampf- oder elektrisch-beheizte Wärmöfen weit zweckmäßiger als die schlechter regelbaren Gasöfen. Die Folgen schlechter Stanzbarkeit, sei sie nun durch ungeeigneten Stoff oder unsachgemäße Anwärmung verursacht, zeigen sich in wachsender Aufrauhung der Schnittkanten und Zerschneiden des Stanzgitters. Jeder Bruch des Stanzstreifens hat ein Versagen des Werkstofftransportes zur Folge und führt damit unweigerlich zu Ausschubteilen. Daß mit wachsender Materialstärke das Verstanzen schwieriger wird, dürfte einleuchtend sein, und so findet dann die Stanzbarkeit bei etwa 2,5—3 mm eine Grenze. Mit Sonderwerkzeugen läßt sich allenfalls noch 4 mm starkes Material schneiden, darüber hinaus aber werden die Schnittkanten so rau, daß sie den Ansprüchen der Feinwerktechnik nicht mehr genügen.

Auch im Zusammenbau werden an den Werkstoff noch hohe Anforderungen gestellt, die natürlich von dem spröderen Super-Hartpapier schwerer zu erfüllen sind, als von dem immerhin zäheren Hartpapier der Klasse III. Dies gilt vor allem für das Aufziehen von Spulenseitenscheiben auf Spulenkern. Aus Preisgründen werden jetzt allgemein die sog. körperlosen Spulen bevorzugt. Hier müssen die Hartpapierscheiben im Festsitz auf Eisenkerne aufgebracht werden. Beim Rundkern läßt sich durch Rändelung des Kernes diese Aufgabe noch leichter bewältigen, da die spitzen Zähne des Rändels sich in das Hartpapier eindrücken, ohne einen zu starken Radialdruck auszuüben. Der Flachkern hat dagegen in seiner Breite Übermaß, so daß die ganze Schmalseite der Lochung eine starke Pressung erhält und, unterstützt durch die Kerbwirkung der scharfen Ecken, leicht Einrisse entstehen. Da die Spulenseitenscheiben



später den gesamten Wicklungsdruck aufzunehmen haben, dürfen auch kleine Einrisse nicht zugelassen werden. Ähnliche Schwierigkeiten entstehen beim Einnieten von Buchsen, die verdrehungssicher sein müssen. Dies ist ein häufiger Fall bei der Herstellung von Klemmleisten aller Art. Die Sicherheit gegen Verdrehung wird hier durch Rändelung der Auflagefläche an der Klemmbuchse angestrebt; es ist klar, daß beim Einnieten durch die Kerbwirkung des Rändels erhebliche Beanspruchungen des Hartpapiers entstehen müssen. Auch diese Zusammenbauarbeiten erfordern daher, zumindest beim Super-Hartpapier, eine vorhergehende Anwärmung des Werkstoffes. Daß man heute in den Werkstätten die immerhin nicht ganz einfache Verarbeitung von Hartpapieren gut beherrscht, zeigen die Beispiele in Abb. 185, bei denen man sogar Durchreißoperationen ausgeführt hat, um dadurch zu besonders geschickten Konstruktionen zu kommen.

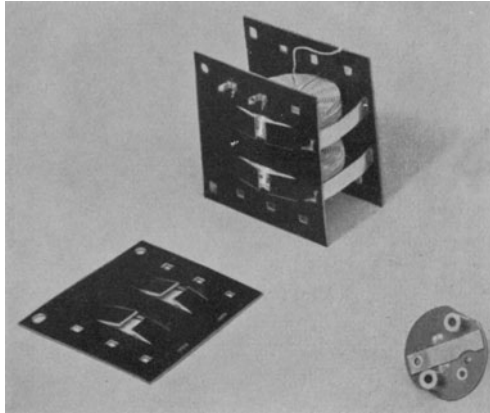


Abb. 185. Konstruktive Anwendungen des „Durchreißens“ bei Hartpapieren.

Neben dem Hartpapier-Plattenmaterial werden auch Rohre für die verschiedensten Zwecke gebraucht. Abb. 186 zeigt die Verwendung bei einem Walzenschalter. Die Konstruktion beweist, daß man auch befriedigend Gewinde in Hartpapier schneiden kann. Leider haben die Rohre entsprechend ihrer Herstellungsart ein nicht so festes Gefüge wie die Platten, da sich nicht ein so starker Preßdruck wie bei diesen erzielen läßt. Das wirkt sich ungünstig in der Wasseraufnahme aus, die bei Rohren stets erheblich höher ist als bei Platten. Häufig werden Hartpapierrohre als Träger für frei gewickelte Spulen benutzt (Abb. 187 links); dem ist ein Spulenkörper gegenübergestellt, der durch Schachtelung

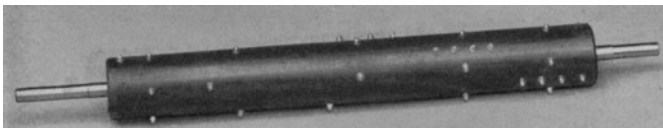


Abb. 186. Walzenschalter mit Hartpapierrohr.

Neben dem Hartpapier-Plattenmaterial werden auch Rohre für die verschiedensten Zwecke gebraucht. Abb. 186 zeigt die Verwendung bei einem Walzenschalter. Die Konstruktion beweist, daß man auch befriedigend Gewinde in Hartpapier schneiden kann. Leider haben die Rohre entsprechend ihrer Herstellungsart ein nicht so festes Gefüge wie die Platten, da sich nicht ein so starker Preßdruck wie bei diesen erzielen läßt. Das wirkt sich ungünstig in der Wasseraufnahme aus, die bei Rohren stets erheblich höher ist als bei Platten. Häufig werden Hartpapierrohre als Träger für frei gewickelte Spulen benutzt (Abb. 187 links); dem ist ein Spulenkörper gegenübergestellt, der durch Schachtelung

von 6 Hartpapierstanzteilen gewonnen wird (Abb. 187 rechts). Die Festigkeit der Hartpapiere ist vergleichsweise sehr hoch, insbesondere wird eine beachtenswerte Schlagbiegefestigkeit erreicht. Man konnte daher unbe-

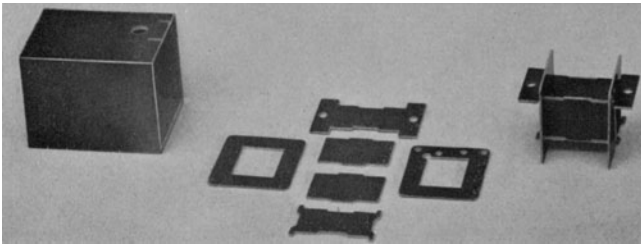


Abb. 187. Ausbildung von Spulenkörpern aus Hartpapier.

denklich die Fingerscheibe an den Fernsprechstationen im Austausch gegen die bisher verwendeten vernickelten Messingscheiben aus Hartpapier herstellen.

Gegenüber den Hartpapieren treten die Hartgewebe an Bedeutung zurück. Sie zeigen bessere mechanische, aber schlechtere Isolationswerte; dementsprechend werden sie in der Fernmeldetechnik vorzugsweise an

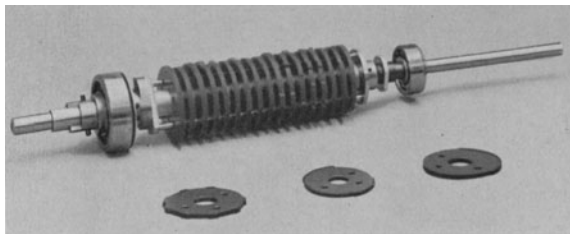


Abb. 188. Nockenscheiben aus Hartgewebe.

solchen Stellen benutzt, wo sie mechanische Funktionen zu erfüllen haben. Wie im Maschinenbau verwendet man Hartgewebe für Zahnräder und Schneckenräder; besonders gern aber nimmt man diesen Werkstoff auch für Nockenscheiben (Abb. 188). Tränkt man diese Hartgewebeteile in heißem Maschinenöl, so hat man den Vorteil, daß eine gewisse selbsttätige Schmierung in der späteren Verwendung gegeben ist.

### E. Kunstharzpreßstoffe.

Nächst dem Hartpapier nehmen die Kunstharzpreßstoffe einen besonders breiten Raum in der Fernmeldetechnik ein. Sie tun dies auf Grund der hervorragenden Formgebungsmöglichkeit, die dem Preßvor-

gang eigen ist. Man kann schwierigst geformte Teile ausbilden, die auf anderem Wege überhaupt nicht wirtschaftlich herstellbar wären, und man kann dadurch leichter als sonst Ansprüchen an Formschönheit Rechnung tragen. Ein Beispiel dafür ist der bereits früher erwähnte Handapparat für Fernsprechstationen. Hier läßt sich aber zugleich dartun, wie anpassungsfähig die Preßtechnik ist. Die zuerst entwickelte Form (Abb. 189 links) des Handapparatekörpers entsprach nicht ganz der anatomisch gegebenen gegenseitigen Lage von Hör- und Sprechöffnung. Es wurden daher an etwa 5000 Personen Kopfmessungen vorgenommen, als deren Ergebnis die neue Form (Abb. 189 rechts) als richtigste gefunden wurde. Keine andere Fertigungstechnik hätte sich dieser neuen Gestaltung so leicht einfügen können wie die Preßtechnik. Der Vorteil der Preßtechnik liegt eben darin, daß die schwierige Formgebungsarbeit nur einmal, nämlich bei der Herstellung der Form, zu leisten ist, während dann nahezu beliebige Mengen von Preßteilen fast mühelos zu erhalten sind. Die Herstellung solcher stählernen Preßformen erfordert hervorragende Facharbeiter und beansprucht erhebliche Zeit. Die unvermeidlich hohen Kosten für die Form sind wirtschaftlich nur tragbar, wenn sie auf eine genügende Stückzahl umgelegt werden können. Daß die Fernmeldetechnik

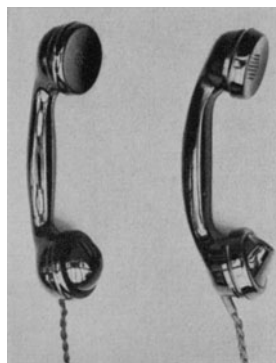


Abb. 189. Mikrotelephon-Handapparate aus Phenoplast Typ S. Links alte, rechts neue Form.

es vorzugsweise mit Massenfertigung zu tun hat, ermöglicht ihr erst die umfangreiche Anwendung der Isolierpreßstoffe. Es sind also nicht so sehr die Isoliereigenschaften der Preßteile, als vielmehr ihre günstigen Herstellungsmöglichkeiten und damit die Wirtschaftlichkeit ihrer Verwendung, die für die Fernmeldetechnik ausschlaggebend sind.

Wirtschaftliche Erwägungen sind es auch, die dazu führen, daß in der Hauptsache Phenoplaste vom Typ S verarbeitet werden. Ist, wie oben dargelegt, die Form so wertvoll und teuer, so muß natürlich das Bestreben darauf gerichtet sein, sie weitgehend auszunutzen. Das geschieht nicht nur durch Herstellung großer Stückzahlen, sondern vor allem auch durch möglichste Verminderung der Herstellungszeit für das einzelne Stück. Dadurch kann unter Umständen die Anfertigung einer zweiten Form gespart werden, die andernfalls zur Befriedigung der Lieferungsansprüche nötig wäre. Da nun die Preßteile bis zur völligen Aushärtung, d. h. bis zur vollkommenen Überführung in Resite, in den Formen verbleiben müssen, kann man am billigsten Teile aus den Schnellpreßmassen herstellen, bei denen durch Zusatz von Hexamethylentetramin

als Beschleuniger ungemein schnell und vollständig die Durchhärtung der Preßmasse erfolgt. Dazu kommt als weiterer Vorteil, daß die Schnellpreßmassen höhere Festigkeitswerte ergeben als die Massen vom Typ O. Die Einbuße an elektrischer Güte fällt demgegenüber nicht ins Gewicht.

In der gleichen Richtung der besseren Formausnutzung durch Verringerung der Preßzeit liegt auch das in neuerer Zeit immer häufiger angewendete Verspritzen der Pheno- und Aminoplaste, das vor allem für starkwandige Teile vorteilhaft ist. Dieses Spritzverfahren ist allerdings durchaus verschieden von jenem, welches bei der Verarbeitung thermoplastischer Massen, etwa der Azetylzellulose, Anwendung findet. Bei den härtbaren Kunstharzen kann ja nicht die Preßmasse in einem

Vorratsbehälter vorgewärmt werden, da sie dabei bereits aushärten würde. Die Masse wird vielmehr nur in einen Füllraum eingegeben und dann mittels Stempeldruck durch eine beheizte Düse in die Form gepreßt (Abb. 190). Hierbei muß die Masse den engen Düsenmund passieren und wird dabei bereits gut durchwärmt. Äußerlich ist einem Preßteil aus Typ S nicht anzusehen, ob es durch Spritzen oder das sonst übliche Pressen hergestellt wurde; in Preis und Liefermenge kommen aber die Vorteile des Spritzverfahrens zum Ausdruck.

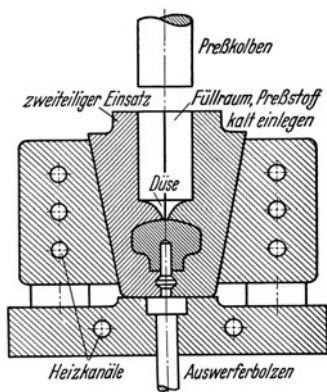


Abb. 190. Form zur Herstellung eines Drehknopfes aus Phenoplast nach dem Spritzverfahren. (Nach MEHDORN: Die Kunstharzpreßstoffe.)

Neben der Preßmasse Typ S findet in der Fernmeldetechnik vor allem noch der Typ T Beachtung, da die erheblich gesteigerte Festigkeit, die die Verwendung von Gewebeschnitzeln oder Gewebebahnen mit sich bringt, für alle Fälle Bedeutung hat, in denen mit größeren Schlägen oder Stößen gerechnet werden muß. Das gilt vor allem für die Gehäuse von tragbaren Fernsprengeräten, aber ebenso auch für die Kupplungsstecker von Anschlußleitungen u. dgl. Von Interesse sind daher auch die Bemühungen um einen neuen Preßstoff, der in Plattenform geliefert wird, die aus kunstharzgetränkten Zellulosefellen geschichtet sind. Leider lassen sich allerdings die äußerst günstigen mechanischen Werte, die an Probestäben erreicht werden, bei vielen praktischen Preßteilen nicht nutzbar machen, da beim Preßvorgang die Zellulosebahnen zerrissen werden und damit wieder die Festigkeit auf das sonst übliche Maß herabsinkt.

Alle Phenolpreßstoffe haben den Nachteil, daß sie in hellen und bunten Farben infolge der Eigenfärbung des Harzes nicht gut herstellbar sind.

Die Farben sind nicht leuchtend, und infolge allmählicher Verfärbung des Kunstharzes durch Lichteinwirkung sind sie nicht lichtbeständig. In solchen Fällen treten dann die Aminoplaste an ihre Stelle. Das Karbamidharz zeigt die ungünstigen Eigenschaften des Phenol- und Kresolharzes nicht, und so bekommt man hier rein weiße, aber auch alle bunten hellen Farbtönungen in lichtbeständiger Form. Daran hat die Fernmeldetechnik vielfach Interesse. Ein Beispiel sind die Lichtrufanlagen, wo besonders in Krankenhäusern weiße Abdeckplatten für die Ruftasten und die Leuchtfelder verlangt werden; aber auch Fernsprechtischstationen werden ab und an in weißer oder gar farbiger Ausführung verlangt. Die Aminoplaste haben allerdings die unangenehme Eigenschaft, daß sie bei erhöhter Feuchtigkeit zum Reißen neigen, dies um so mehr, je größer der Querschnitt ist. Abb. 191 gibt einen kleinen Schalthebel wieder, der diese Erscheinung deutlich zeigt. Ebenso ist u. U. bei größeren Platten mit einem unerwünschten Verziehen zu rechnen.

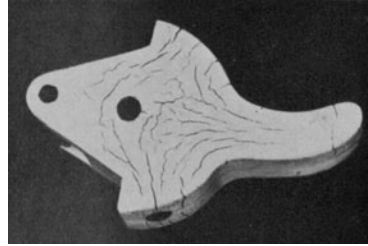


Abb. 191. Fehlerhafter Schalthebel aus weißem Aminoplast. Ribbildung durch langdauernde Einwirkung hoher Feuchtigkeit.

Der Preßstoff gibt nun dem Konstrukteur außerordentlich günstige Möglichkeiten zu geschickten Gestaltungen. Dies soll durch einige Beispiele belegt werden. Der in Abb. 192 dargestellte billige Wecker ist vollkommen auf einer Preßstoff-Grundplatte montiert. Alle Metallteile sind dadurch verdrehungssicher befestigt, daß sie in entsprechende Vertiefungen des Preßstoffes eingesetzt sind. Man kommt so an allen Stellen mit einer Vernietung oder Verschraubung aus. Für die Befestigung der Kappen hat man sich zunutze gemacht, daß dünnwandige Preßteile eine beachtliche Federung aufweisen. So können durch seitliches Zusammendrücken der Kappe die Preßstoffnasen in die entsprechenden Schlitze der Grundplatte eingeführt werden; beim Loslassen der Kappe federn sie

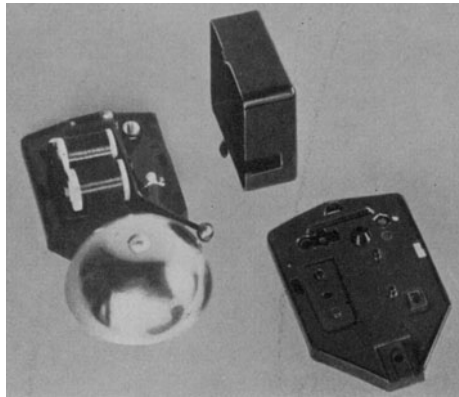


Abb. 192. Einfacher Gleichstrom-Wecker. Beispiel für geschickte Gestaltung bei Verwendung von Isolierpreßteilen.

Man kommt so an allen Stellen mit einer Vernietung oder Verschraubung aus. Für die Befestigung der Kappen hat man sich zunutze gemacht, daß dünnwandige Preßteile eine beachtliche Federung aufweisen. So können durch seitliches Zusammendrücken der Kappe die Preßstoffnasen in die entsprechenden Schlitze der Grundplatte eingeführt werden; beim Loslassen der Kappe federn sie

zurück und halten diese fest. Als weiteres Beispiel möge der moderne schnurlose Klappenschrank dienen. Bei den früheren Ausführungen gaben die Verbindungsschnüre vielfach zu Klagen Anlaß, weil gelegentlich Unterbrechungen oder Aderschlüsse unvermeidlich waren. Bei dem

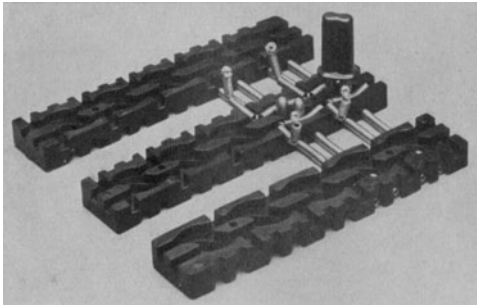


Abb. 193. Isolierpreßleisten für einen schnurlosen Klappenschrank. Die Leisten dienen als Träger der Verbindungsschraubenfedern aus Bronze.

schnurlosen Klappenschrank wird die Verbindung durch Steckerstifte hergestellt, die zwischen je eine waagrecht und senkrecht verlaufende Bronzespirale eingeführt werden. Die Aufnahme und Lagerung der Spiralen erfordert Isolier-

teile, die in der Formgebung so kompliziert sind, daß sie sich eben nur im Preßvorgang wirtschaftlich herstellen lassen (Abb. 193). Besondere Vorteile bietet die Preßtechnik bekanntlich noch darin, daß sich Metalle in die Preß-

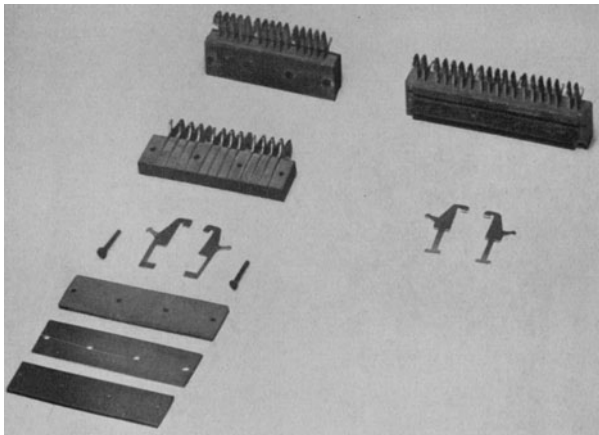


Abb. 194. Vorteilhafte Gestaltung einer Anschlußleiste bei Verwendung von Isolierpreßstoff. Links: Alte, teure Ausführung aus vielen Einzelteilen. Rechts: Neue Ausführung, Anschlußfedern in den Isolierstoff eingepreßt.

teile einbetten lassen. Auch davon macht die Fernmeldetechnik umfangreichen Gebrauch. Als Beispiel seien nur die Messer- und Federleisten aufgeführt, die in der automatischen Telephonie viel als Anschlußleisten benutzt werden. Die Gegenüberstellung der früheren und

der jetzigen Ausführung solcher Anschlußleisten vermittelt einen besonders sinnfälligen Eindruck von der Vereinfachung und Verbilligung, die sich durch die Einführung des Preßverfahrens erzielen ließ (Abb. 194).

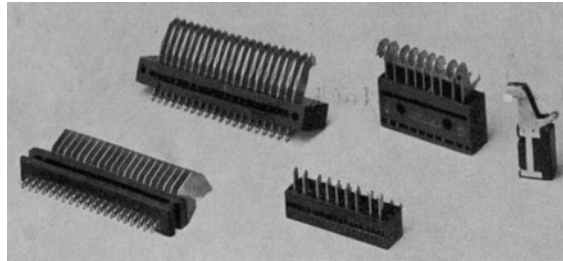


Abb. 195. Verschiedene Ausführungsformen von Messer- und Federleisten aus Isolierpreßstoffen.

Hier können allerdings Phenoplaste nicht zur Anwendung kommen, da bei den hohen Preßtemperaturen die Metalle anlaufen würden. Es ist dies wohl der einzige Fall, wo in der Fernmeldetechnik Kopalpressungen vom Typ VII verwendet werden. Da die Masse beim Preßvorgang erheb-

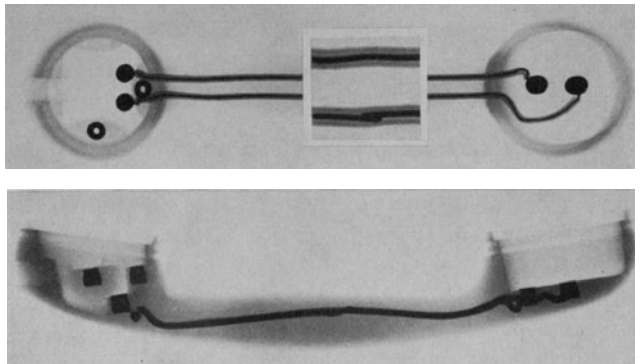


Abb. 196. Röntgenaufnahme eines Mikrotelephon-Handapparates mit eingepreßten Verbindungsleitungen. Der vergrößerte Ausschnitt zeigt eine Fehlerstelle; der Kupferdraht ist durch den Schub der Preßmasse zerrissen, während die Weichgummihülle des Drahtes die Dehnung ausgehalten hat.

liche Schubkräfte ausübt, müssen natürlich alle Metallteile gut in der Form festgehalten werden. Diesem Zweck dient die sonst überflüssige Einsenkung bei den Preßleisten (Abb. 195).

Durch den Schub der Preßmasse traten auch bei den schon mehrfach erwähnten Handapparaten gelegentlich Zerreißen an den eingepreßten Verbindungsleitungen auf. Das Röntgenbild in Abb. 196 zeigt einen

derartigen Fall. Dabei ist interessant zu sehen, daß die Weichgummiumhüllung des Leitungsdrahtes unbeschädigt geblieben ist. Sie hat bei ihrer hohen Dehnbarkeit den Schub der Preßmasse ohne Bruch überstanden; der Kupferdraht ist dagegen innerhalb der Weichgummisolation gerissen. Als dann die Masse geschmolzen und leichter beweglich war, hat sich die Gummihülle wieder zusammengezogen und dabei auch die zerrissenen Kupferdrahtenden einander wieder genähert. Dieses Verhalten ist insofern bedenklich, als unter Umständen zunächst noch Kontakt vorhanden sein kann, der dann im Laufe der Zeit durch Oxydation oder geringe Verlagerung aufgehoben wird und damit zum Versagen des Handapparates führt. Man hat daher bei der Neukonstruktion des Handapparates die eingepreßten Verbindungsleitungen verlassen und preßt jetzt einen Verbindungskanal zwischen Mikrophon- und Telephoneseite ein, durch den nachträglich die Verbindungsdrähte eingezogen werden.

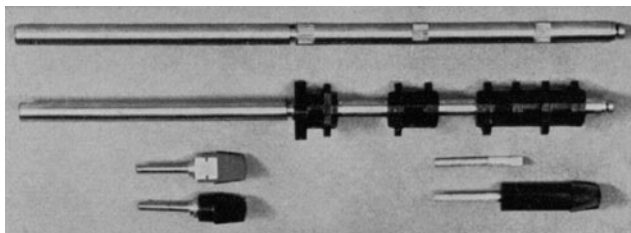


Abb. 197. Mit Phenoplast umpreßte Schaltachsen.

Besonders gern macht man von dem Einpressen metallener Gewindebuchsen Gebrauch; für nicht besonders hoch beanspruchte Gewinde genügt aber durchaus ein in den Preßstoff selbst eingearbeitetes Gewinde, sei es nun im Preßvorgang erzeugt, oder, was das Häufigere ist, nachträglich eingeschnitten. In gleicher Weise wie man Metallteile aller Art in Isolierstoffe einbettet, kann man auch umgekehrt Metallteile mit Isoliermaterial umpressen. Als Beispiel diene eine Schaltachse für einen Rundfunkempfänger (Abb. 197). Die feste Verankerung von Preßstoff und Metall ist durch die Rändelung der Achse gesichert. In diesem Falle ermöglicht die Umpressung eine sehr billige Herstellung der Schaltachse und bietet zugleich die Gewähr dafür, daß die Nocken stets richtig zueinander stehen. Ein entsprechendes Beispiel bildet der Drehknopf einer Rückkopplungsachse. Da das Einlegen der Eisenachse in die Preßform immerhin eine gewisse Griffzeit bedingt, hat es sich vielfach als vorteilhafter erwiesen, die Knöpfe für sich zu pressen und danach auf die gerändelte Achse aufzuziehen. Natürlich erfordert dieses Verfahren genaue Toleranzeinhaltung bei Achse und Knopf.

Die Phenoplaste vom Typ S weisen heute so günstige mechanische



und Wärmefestigkeitswerte auf, daß sie als wertvolle Baustoffe für die Fernmeldetechnik gelten dürfen. Wenn sich daneben noch immer in bestimmten Fällen die Azetylzellulosemassen vom Typ A behaupten konnten, so sind dafür zwei Gesichtspunkte maßgebend. Erstens die außerordentlich hohe Zähigkeit dieser Massen, und zweitens die Möglichkeit, sie im Spritzverfahren zu verarbeiten. Die zweite Eigenschaft verdanken sie der Tatsache, daß sie thermoplastisch, d. h. im Gegensatz zu Pheno- und Aminoplasten durch Erwärmung erweichbar und schließlich schmelzbar sind. Sie können daher im Behälter der Spritzmaschine durch Beheizung plastisch gemacht und in diesem Zustande durch Stempeldruck in Stahlformen gespritzt werden, wo sie unmittelbar an den kühlen Formwandungen erstarren. Das Spritzverfahren arbeitet daher sehr schnell und wirtschaftlich und ist für kleine Teile besonders geeignet. Die schnelle Erreichung des plastischen Zustandes bei Erwärmung, die für die Verarbeitung dieser Massen so günstig ist, muß natürlich für die gefertigten Teile selbst als erheblicher Nachteil verbucht werden. Preßteile vom Typ A haben nur eine Wärmefestigkeit von ca.  $50^{\circ}$  nach MARTENS und sind in dieser Beziehung den härtbaren Preßstoffen weit unterlegen. Die zweite typische Eigenschaft der Azetylzellulosemassen, ihre hohe Zähigkeit, wird beispielsweise bei den Mikrophoneinsprachen der Handapparate und bei den zu ihrer Befestigung dienenden Überwurfringen ausgenutzt. Halten doch diese Einsprachen als Mindestbedingung einen dreimaligen Schlag durch ein Gewicht von 300 g, welches aus 60 cm Höhe herabfällt, also 18 cmkg Schlagarbeit, ohne Beschädigung aus.

Gleichfalls ein Spritzstoff ist das von der I. G. Farben vor nicht langer Zeit auf den Markt gebrachte Trolitul, welches seiner chemischen Natur nach ein Polystyrol ist (vgl. S. 70). Im Gegensatz zu den bisher genannten Preßstoffen zeichnet es sich durch niedrige Dielektrizitätskonstante und sehr geringen Verlustwinkel aus. Es ist  $\text{tg } \delta$  etwa  $2 \cdot 10^{-4}$ , während  $\epsilon$  den Wert 2,3 besitzt. Damit ist das Anwendungsgebiet des Trolituls in der Hochfrequenztechnik zu suchen. Wenn Trolitul nicht so umfangreiche Verwendung findet, wie man auf Grund der hervorragenden dielektrischen Werte vermuten sollte, so sind dafür drei Nachteile verantwortlich. Erstens ist die Wärmefestigkeit mit  $65^{\circ}$  C nur gering; da diese Temperatur in Radiogeräten nahezu erreicht wird, besteht die Gefahr, daß Trolitulteile, wenn sie unter mechanischer Spannung stehen, nachgeben und sich verformen können. Zweitens neigt das Trolitul dazu, infolge innerer Spannungen zu reißen, besonders wenn es auch durch Außenkräfte mechanisch beansprucht wird. Beispielsweise zersprangen kleine Schraubnippel aus Trolitul, obwohl sie nur mit halbem Bruchmoment angezogen waren, nach etwa acht Tagen von selbst. Schließlich ist noch der verhältnismäßig hohe Preis des Trolituls seiner Anwendung hinderlich.

Man nimmt das reine, glasklare Trolitul ohne Füllstoffe nur in solchen

Fällen, wo es mechanisch gering beansprucht ist. Ein Beispiel hierfür bieten Spulenkörper für Hochfrequenzspulen; die einzige Beanspruchung dieser Körper besteht in dem ganz geringen Wicklungsdruck der Spulendwindungen. Durch Beimengung von mineralischen Füllstoffen zum Trolitul hat man versucht, seine Wärmefestigkeit zu erhöhen. In mäßigem Umfang ist das beim Trolitul Si und dem Amenit gelungen. Merklche Vorteile in dieser Hinsicht bieten aber erst die auf etwas anderer chemischer Grundlage aufgebauten Luvikane<sup>1</sup>, die ebenfalls spritzbar sind, und bei denen Wärmefestigkeiten bis zu 150° C erreicht werden können. Diese Entwicklung ist allerdings noch so jung, daß sie erst in bescheidenem Umfange technisch ausgenutzt wird, und daß Abschließen des noch nicht darüber gesagt werden kann. Die Zumengung von Füllstoffen nimmt dem Trolitul auch die unangenehme Rißeigung. Es finden daher gefüllte Trolitule, die in den verschiedensten Farben herstellbar sind, Verwendung für Druckknöpfe, Schaltergriffe u. dgl. kleine Teile. Hierbei ist noch als besonderer Vorteil hervorzuheben, daß die Wasseraufnahmefähigkeit des Trolituls außerordentlich klein ist. Es ist also nicht zu befürchten, daß sich Druckknöpfe bei hoher Feuchtigkeit in ihren Führungen festklemmen, wie dies leider bei Druckknöpfen aus Zellon und Trolit vorkommen kann.

## F. Papier und Gewebe.

In der Fernsprechtechnik werden sowohl Hadernpapiere auf der Basis Hanf oder Flachs, wie auch Zellulosepapiere, und zwar Sulfit- und Natronzellulosepapiere benutzt. Zwei große Anwendungsgebiete bilden die Domäne für das Isolierpapier: die Wickelkondensatoren und die Windungsisolierungen von Spulen. Da Papier hygroskopisch ist und durch Feuchtigkeitsaufnahme aus der Luft an Isolierfähigkeit einbüßt, muß man es mit einer dichten Hülle umschließen oder tränken. Andererseits hat bei den Kondensatoren das verwendete Imprägniermittel einen entscheidenden Einfluß auf die dielektrischen Werte des Kondensators. Als Tränkmittel kommen vorzugsweise Paraffin, Spezialvaseline oder Kunstwache in Betracht. Mit den letztgenannten, bei denen es sich um chloriertes Naphthalin handelt, wird eine Dielektrizitätskonstante von etwa 5 gegenüber 2 bei Paraffin erreicht. Es läßt sich demnach bei Anwendung eines derartigen Wachses eine beträchtliche Material- und Raumersparnis erzielen. Allerdings müssen diese Wachse mit Vorsicht verarbeitet werden, da sie schwere gesundheitliche Schädigungen verursachen können. Trotz der Imprägniermittel muß noch sorgsam darauf geachtet werden, daß die Kondensatorenwickel völlig von der Einwirkung

<sup>1</sup> Die neue Handelsbezeichnung der I.G.Farben für diese Stoffe ist „Trolitul Luv“.

der Luftfeuchtigkeit abgeschnitten werden. Es werden daher die einfacheren Kondensatoren nach dem Einsetzen in Blechbehälter durch Verußmassen abgeschlossen, während erhöhte Anforderungen an Isolation bzw. absolute Tropenfestigkeit durch Hochleistungskondensatoren erfüllt werden, bei denen allseitig verlötete Gehäuse mit eingelöteten Porzellandurchführungen verwendet werden. Der Vorteil des Papiers bei der Verwendung in Kondensatoren liegt darin, daß es in sehr geringen Stärken, bis zu 0,015 mm herunter, hergestellt werden kann, so daß auf sehr kleinem Raum hohe Kapazitäten unterzubringen sind. Übertroffen werden die Papierkondensatoren in dieser Hinsicht nur noch von den Elektrolytkondensatoren, deren Aufbau insofern interessant ist, als das Dielektrikum von einer dünnen Aluminiumoxydschicht gebildet wird, die in einem besonderen elektrochemischen Formierungsprozeß auf die verwendete Aluminiumfolie aufgebracht wird. Da es sich hierbei nur um Schichtstärken von wenigen  $\mu$  handelt, können natürlich noch weit größere Kapazitäten je Raumeinheit untergebracht werden als bei Papierkondensatoren. Die Kurven in Abb. 198 zeigen diese Verhältnisse deutlich. Auch bei höheren Betriebsspannungen läßt sich auf gleichem Raum eine etwa 8 bis 10 mal größere Kapazität herstellen als bei Papierkondensatoren. Allerdings sperrt die Aluminiumoxydschicht nur in einer Stromrichtung, so daß nur pulsierender Gleichstrom aufgenommen werden kann.

Papiere, die für Spulenisolationen verwendet werden, sind üblicherweise mit einer Öllackisolierung versehen. Sie dienen zunächst zur Kernisolation bei körperlos aufgebauten Spulen (Abb. 199). Hierbei wird das Lackpapier breiter gehalten, als dem Raum zwischen den Spulenseitenscheiben entspricht. Es wird an beiden Seiten mit einer Fiederung versehen, um einen sicheren Anschluß der Kernisolation an die Seitenscheiben zu gewährleisten. Werden auf einer Spule mehrere Wicklungen aufgebracht, so werden sie wiederum durch Zwischenlagen aus Lackpapier voneinander isoliert und schließlich wird die fertige Spule durch einen Überzug aus Lackpapier gegen äußere Beschädigungen geschützt. Bei frei gewickelten Spulen, die also nicht durch Seitenscheiben begrenzt sind, müssen sogar nach jeder Drahtlage Papierbahnen eingeschossen werden, um der Wicklung den nötigen Halt zu geben. Auch an der Herausführung der Wicklungsenden wird Lackpapier zur Isolation verwendet. Man wickelt für diesen Zweck kleine Papierröhrchen, die über

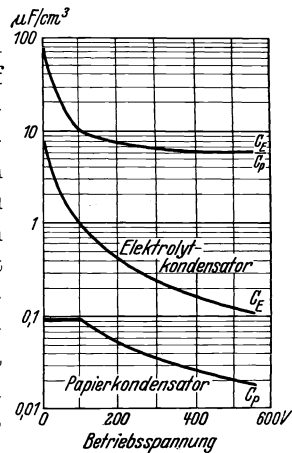


Abb. 198. Spezifische Raumkapazität von Elektrolyt- und Papierkondensatoren für die Fernmeldetechnik.

die Drahtenden übergeschoben werden und so verhindern, daß der herausgeführte Draht etwa mit anderen Drahtlagen Schluß geben könnte. Durchschlagfestigkeit und Isolationswerte dieser Lackpapiere liegen üblicherweise so hoch, daß sie für alle Zwecke der Fernmeldetechnik genügen. Bedenklicher ist, daß die Öllacke der dauernden Einwirkung hoher Feuchtigkeit nicht gewachsen sind. Unterwirft man Öllackpapiere Tropenbeanspruchungen, so wird der Lack nach etwa einhalb bis drei-viertel Jahr weich und klebrig, und fließt an den tiefer gelegenen Stellen zusammen. Es ist daher immer wieder versucht worden, diesen Fehler durch Verwendung anderer Lacke zu beheben. Hierfür erweisen sich Zelluloselacke als brauchbar; sie haben aber wieder den Nachteil, daß sie nur als Filme dem Papier aufgelagert sind und die Papierfaser

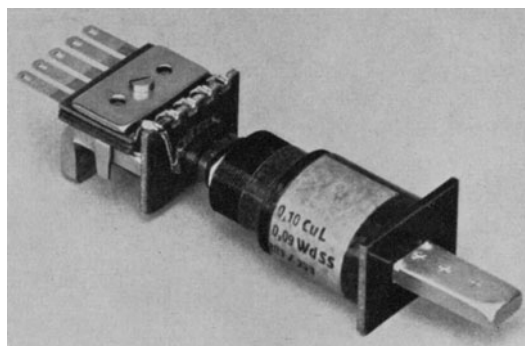


Abb. 199. Verwendung von Lackpapier beim Aufbau von Relaispulen.

nicht durchtränken, wie dies der Öllack tut. Dadurch kann das Papier von den Schnittkanten her Feuchtigkeit aufsaugen und an dünnen Kupferdrähten, die mit ihnen in Berührung kommen, Korrosionen hervorrufen.

Ähnlichen Verwendungszwecken wie das Lackpapier dienen auch Lackleinen und Lackseide. Die letztere bietet den Vorteil, daß sie außerordentlich dünn ist. Es wird daher vorzugsweise Lackseidenband dazu benutzt, um Lötstellen innerhalb von Spulen abzuisolieren. Auch die Lackschläuche müssen in diesem Zusammenhang erwähnt werden. Es handelt sich dabei um nahtlos gewebte Schläuche aus Baumwolle, Seide oder Kunstseide, die mit Öllack oder neuerdings auch mit Zelluloselack getränkt werden. Sie werden bei der Schaltung von Fernmeldegeräten zur Isolierung von Blankdrähten benutzt. Auch hier sucht man, den Öllack wegen seines Erweichens bei Tropenklima durch Zelluloselackierungen zu ersetzen. Dazu kommt allerdings noch das Bestreben,

die Brennbarkeit des Schlauches herabzumindern, was insbesondere durch Anwendung von Benzylzelluloselacken erreicht werden kann. Die Lackschläuche stehen im Wettbewerb mit den Schaltdrähten, die praktisch ebenfalls aus einem Drahtleiter mit einem lackierten Gewebe als Isolation bestehen, nur daß in diesen Fällen die Isolation fest und unverschieblich auf dem Leiter angebracht ist. Ob man Lackschläuche oder Schaltdrähte verwendet, ist nur eine Wirtschaftlichkeitsfrage. Gegenüber dem Schaltdraht erspart man beim Lackschlauch das Abisolieren, kann allerdings den Gewinn an Arbeitszeit leicht wieder einbüßen, wenn die Lackschläuche im Innendurchmesser zu knapp oder gar durch Lacktropfen verklebt sind. Die Durchschlagfestigkeit der Lackschläuche und Schaltdrähte liegt bei guten Fabrikaten so hoch, daß sie die üblichen Anforderungen der Fernmeldetechnik im allgemeinen weit überschreitet. Die Gefahr in dieser Hinsicht liegt aber darin, daß die Lackschichten bei kurzen Abbiegungen einreißen und aufblättern, und daß an einer solchen Stelle natürlich die Durchschlagfestigkeit stark herabgesetzt ist. Es wird daher die Verwendbarkeit von Schläuchen und Schaltdrähten stets durch die Herstellung einer Wickellocke geprüft, deren Innendurchmesser gleich dem dreieinhalbfachen Nenndurchmesser des Drahtleiters gewählt wird. Da es bekannt ist, daß Öllacke eine solche Beanspruchung oft anfänglich aushalten, aber schließlich unter dem Einfluß der dauernden Spannung aufreißen, wird die Beurteilung der Wickelprobe erst nach 24 Stunden vorgenommen. Eine noch schärfere Beanspruchung bedeutet für diese Isoliermaterialien die Tränkung mit Ozokerit. Eine solche Tränkung muß bei Transformatoren- und Drosselspulen oft vorgenommen werden, und damit sind dann die über die Spulenabzweigungen und Spulenenden geschobenen Lackschläuche dieser Beanspruchung ausgesetzt. Bei den Öllacken verwendet man durchsichtige und ungefärbte Lacke. Will man die Leitungen durch Farben kennzeichnen, so muß das Gewebe bereits entsprechend gefärbt sein. Da die Öllacke immer gelblich sind, bekommen die Farben eine unklare Tönung. In dieser Beziehung sind die Zelluloselacke überlegen, da sie mit Farbstoffen gefüllt werden und somit klare und leuchtende Farben aufweisen. Das ist erwünscht, weil es die Übersicht über die Schaltung in einem Gerät sehr erleichtert.

Zur Schaltung der Gestelle in automatischen Fernsprechämtern benutzte man früher ausschließlich doppelt mit Baumwolle umspinnene Kupferleiter, die mit einem Gemisch von Paraffin und Bienenwachs getränkt werden, um sie gegen Feuchtigkeitsaufnahme unempfindlicher zu machen. Bei den umfangreichen Verdrahtungen ergibt sich der Wunsch, durch dünnere Isolation Raum zu sparen und damit die Schaltung übersichtlicher zu machen sowie das Anlöten der Anschlüsse zu erleichtern. Diesem Wunsche werden die neu entwickelten LKKL- und KKL-Drähte gerecht. LKKL ist die Kurzbezeichnung für Lack-Kunst-

seide-Kunstseide-Lack bzw. 2 mal Kunstseide-Lack. Die Lackierung auf dem Leiter erhöht zwar die Isolationswerte des Drahtes beträchtlich, bereitet aber der Fertigung ziemliche Schwierigkeiten, da an den Anschlußstellen die Lackschicht entfernt werden muß, ohne gleichzeitig

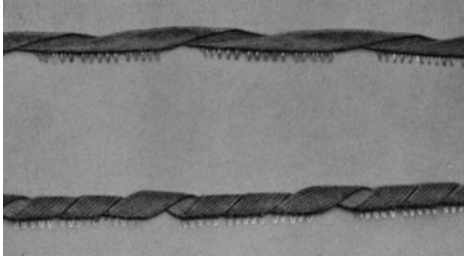


Abb. 200. Seidengewebte Bandkabel zur Vielfachschaltung von Wählerkontaktsätzen.

die darunterliegende Zinnschicht anzugreifen. Eine besonders interessante Isolation findet bei der Vielfachverdrahtung der Wählerkontaktsätze Anwendung. Hier werden lackierte Kupferdrähte auf dem Webstuhl gewissermaßen als Kettenfaden in ein Seidenband eingewebt, wobei in entsprechenden Abständen die Drähte für den

späteren Anschluß zu einer Schlaufe herausgezogen werden. Hieraus werden dann durch Abbiegungen die sog. Bandkabel geformt, die übrigens wieder mit Kunstharzlack oder Wachs getränkt werden (Abb. 200).

### G. Isolation von Wickeldrähten.

Zum Schluß soll noch ein Überblick über die Isolation der Wickeldrähte gegeben werden. Hierfür kommen Umspinnungen mit Baumwolle oder Seide, sowie Einbrennen einer Öllackschicht in Frage. Ausschlag-

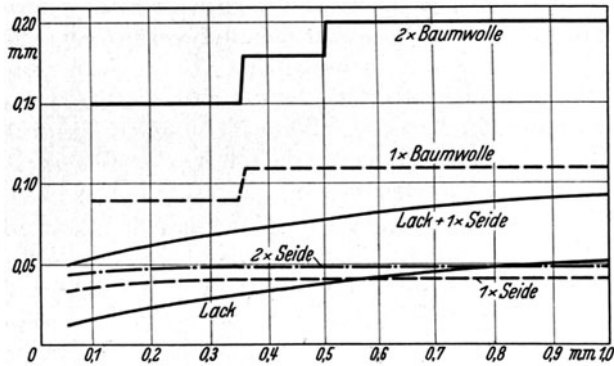


Abb. 201. Durchmesserzunahme für isolierte Feindrähte.

gebend für die Bewertung einer Drahtisolation sind ihre Durchschlagfestigkeit, ihr Raumbedarf und, vom wirtschaftlichen Standpunkt aus ihr Preis. Bei den umspinnenen Drähten ist für die Durchschlagspan-

nung lediglich der durch die Isolation gegebene Abstand von Bedeutung. Für die Lackschichten ist natürlich die Durchschlagfestigkeit wesentlich höher; bei guten Lacken wird ein Wert von mehr als 400 V auf 0,01 mm erreicht. Der geringe Isolationsauftrag ist von höchster Bedeutung, um in dem gegebenen Wickelraum eine größtmögliche Zahl von Amperewindungen unterbringen zu können bzw. bei gegebener Amperewindungszahl mit den kleinsten Spulenabmessungen auszukommen. Von der Größe der Spule ist in gewissem Maße

der Umfang der weiteren Aufbauteile eines Gerätes abhängig. Die Kurven in Abb. 201 zeigen, wie außerordentlich in diesem Punkte der Lackdraht im Vorteil ist. Noch deutlicher wird dies an vergleichsweise gewickelten Spulen, die Abb. 202 wiedergibt. Mit der am stärksten aufragenden doppelten Baumwollisolierung wurde eine Spule gerade voll gewickelt. Hierzu waren 2800 Windungen eines Drahtes von 0,1 mm  $\varnothing$  erforderlich. Mit der gleichen Windungszahl und der gleichen Drahtklasse wurden nun Spulen in den verschiedenen Isolationen, 2 mal Seide, 1 mal Seide, Lack-Seide und Lack gewickelt. Es ist bemerkenswert, einen wie kleinen Wickelraum der Lackdraht nur erfordert, und wird verständlich, daß er unter diesen Bedingungen vorherrschend geworden ist. Der Lacküberzug

wird in mehreren Schichten aufgebracht und jedesmal in einem Durchlaufofen eingebrannt. Einwandfreie Güte des Lackes und sorgfältigste Ofenführung sind die Vorbedingungen für eine gute Lackierung. Der Lack darf weder zu hart eingebrannt sein, da er dann zu spröde ist, noch darf er zu weich gefahren werden, da sonst die Lackschicht an Drahtüberkreuzungen leicht durchgedrückt wird und damit Windungskurzschlüsse entstehen. Eine gute Elastizität des Lackes ist gleichfalls erforderlich, da ja der Draht bei der Verarbeitung immer Reckungen erfährt. Man verlangt von einem guten Lack, daß er auch bei 25proz. Dehnung des Drahtes noch immer fest am Leiter haftet. Den stärksten


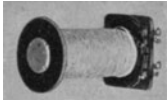
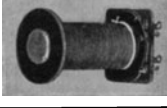

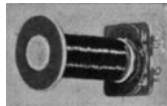
Muster	Drahtisolation	Verbraucher Wickelraum
 a	2 × Baumwolle	100 %
 b	2 × Seide	40,5 %
 c	Lack u. 1 × Seide	38,6 %
 d	1 × Seide	31,8 %
 e	Lack	22,2 %

Abb. 202. Wickelraumaussnutzung bei Verwendung verschiedenartig isolierter Drahtleiter.

Beanspruchungen ist der Lackdraht beim Verwickeln auf Flachkerne ausgesetzt, wo beim Übergang von der Breit- zur Schmalseite starke Beschleunigungen und damit Reckungen des Drahtes auftreten, und wo in den untersten Lagen durch die scharfe Abbiegung noch Biegebeanspruchungen hinzukommen. Die Haftfestigkeit der Lackschicht ist wesentlich von einer einwandfreien Oberfläche des Leiters abhängig, aber auch das Leitermaterial spielt eine erhebliche Rolle. So ist beispielsweise die Herstellung lackierter Aluminium- oder Widerstandsdrähte schwieriger als die von Kupferdrähten.

Gewisse Schwierigkeiten ergeben sich, sobald Lackdrähte mit Imprägniermassen getränkt werden müssen, wie das z. B. bei freigewickelten Spulen zu mechanischen Festlegung der Windungen erforderlich ist. Der übliche Schwarzlackdraht wird von allen Imprägniermassen mehr oder minder erweicht, so daß damit die Gefahr des Durchdrückens der Lackschicht wächst. Man hat daher für Imprägnierzwecke besondere, durchscheinende Lacke entwickelt und die damit isolierten Drähte kommen als sog. Rotlackdrähte in den Handel. Der Name ist daraus entstanden, daß das Kupfer durch den Lackfilm durchschimmert und damit der Draht eine rötliche Färbung erhält, die zu Unrecht dem Lack zugeschrieben wird. Man verwendet Lackdrähte soweit irgend möglich und geht zu umspinnenen Drähten nur über, wenn die Spannung zwischen den einzelnen Lagen 30 V überschreitet, oder wenn bei Hochfrequenzspulen durch den bei Umspinnungen größeren Drahtabstand die Windungskapazität herabgesetzt werden soll. Neuere Entwicklungsarbeiten gehen darauf aus, wie im Falle der Elektrolytkondensatoren, das Aluminiumoxyd als Isolator nutzbar zu machen; man hat dabei das Ziel vor Augen, Spulen zu schaffen, die eine auch bei höchster Überlastung unbrennbare Isolation besitzen. Man benutzt für solche Zwecke Kupaldrähte, die aus einer Kupferseele bestehen, welche von einem dünnen Aluminiummantel umschlossen ist. Die Außenschicht dieses Mantels wird durch das bekannte Eloxal-Verfahren in Aluminiumoxyd übergeführt.

Es konnten in dem gegebenen Rahmen naturgemäß die Fragen der Isolierstoffe in der Fernmeldetechnik nicht erschöpfend behandelt werden. Deshalb wurde bewußt nur der Zweck verfolgt, einen Allgemeinüberblick über das ganze Gebiet zu geben. Es wird jedoch auch dabei der Eindruck vermittelt sein, daß die Fernmeldetechnik sich alle Möglichkeiten, welche die Isoliertechnik bietet, weitgehend zunutze macht.



# Isolierstoffe in der Elektrowärmetechnik.

Von W. FISCHER, Berlin.

## 1. Die Isolierung in der Elektrowärmetechnik.

Die Elektrowärmetechnik bedeutet für die Fragen der elektrischen Isolierung insofern ein Sondergebiet, als hier immer neben der elektrischen Beanspruchung auch die Wärmebeanspruchung steht. Wenn in anderen Zweigen der Elektrotechnik Nebenumstände bei der Wahl des Werkstoffes oder der Gestaltung der Isolation zu berücksichtigen sind, so berühren diese doch meist die elektrischen Fragen nicht unmittelbar, sondern treten zu den

elektrischen als zusätzliche Anforderungen hinzu. In der Elektrowärme sind die Gesichtspunkte der elektrischen Isolierung aber von den Temperaturbedingungen nicht zu trennen, da die Temperatur die elektrischen Eigenschaften der Isolierstoffe entscheidend beeinflusst. Dabei

ist die Wärmebeanspruchung mit der Temperaturbeanspruchung allein

durchaus nicht erschöpft. Die Mannigfaltigkeit der elektrischen und thermischen Anforderungen an die Isolierteile in der Elektrowärmetechnik mag aus einigen Beispielen hervorgehen, die aus der Fülle der elektrischen Heizgeräte herausgegriffen sind.

Abb. 203 zeigt das Innere eines Kammerofens: die Ofenwände sind aus Schamottesteinen aufgebaut mit Nischen, in denen die Heizwendel liegen; sie sollen ihre Wärme nach dem Ofeninnern möglichst frei abgeben, umgekehrt soll durch die Wand möglichst wenig Wärme verlorengehen. Die



Abb. 203. Inneres eines Kammerofens; Heizwendel an der Seite in Nischen und an der Decke auf keramischen Tragrohren.

Formsteine müssen also 1. die Wendel tragen, d. h. genügende mechanische Festigkeit haben, 2. die Temperatur des Heizdrahtes vertragen, die immer etwas höher liegt als die Arbeitstemperatur des Ofens, 3. nach ihrer Rückseite möglichst wenig Wärme ableiten, 4. bei der Berührungstemperatur keine Reaktion mit dem Metall des Heizleiters zeigen. Zu diesen verschiedenen mechanischen und thermischen Anforderungen an den Werkstoff des Heizleiterträgers kommt die elektrische Beanspruchung, da der Heizleiterträger ja zugleich der elektrische Isolator zwischen den einzelnen Zweigen der Heizung ist.

Die Deckenbeheizung ist in anderer Weise ausgeführt. Hier hängen die Wendel auf keramischen Tragrohren. Die Forderung geringer Wärmeleitung, die vorher bei dem Wandstein gestellt war, fällt hier fort. Die Ansprüche an die Warmfestigkeit sind bei dem dünnwandigen Rohr

wesentlich höher als bei dem Nischenstein.

In Abb. 204 sind Heizmuffeln von kleinen Muffelöfen gezeigt, bei denen die Heizwiderstände nicht offen im Innern des Ofenraumes liegen und frei abstrahlen, sondern außen auf eine gebrannte Schamottemuffel aufgelegt und dann in eine feuerfeste

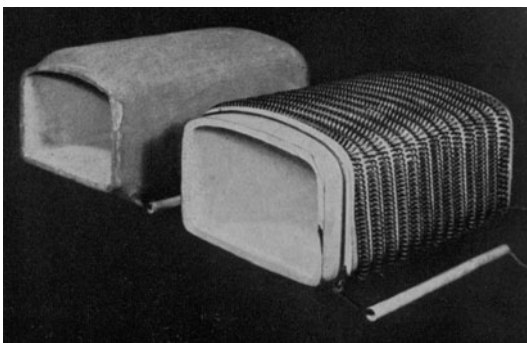


Abb. 204. Kleine Heizmuffel mit und ohne Einbettmasse.

Masse eingebettet sind. Um die Muffel wird außen unmittelbar die Wärmeisolierung aus Kieselgur aufgeschüttet. Von dem Baustoff der Muffel wird hier möglichst gute Wärmeleitfähigkeit verlangt, damit der eingebettete Heizdraht keine zu hohe Übertemperatur gegenüber der geforderten Nutztemperatur der Muffelinnenwand annimmt.

Abb. 205 zeigt eine offene keramische Strahlungskochplatte. Dies ist ein Beispiel für hohe Temperaturwechselbeanspruchung. Die geringe Masse des Heizdrahtes kommt bei der hohen Flächenleistung sehr rasch auf Glühtemperatur, so daß die keramische Platte nicht nur der elektrischen Beanspruchung bei verhältnismäßig hoher Temperatur, sondern dazu noch sehr schroffen Temperaturänderungen ausgesetzt ist.

Eine weitere Art der elektrischen Isolierung zeigt der Schnitt durch eine Kochplatte (Abb. 206), bei der der Heizwiderstand als Wendel in eine Stampfmasse eingebettet ist. Da die Wärme durch die Stampfmasse hindurch an die Gußplatte übertragen wird, muß auch hier die Isolierung bei hoher elektrischer Beanspruchung gute Wärmeleitfähigkeit besitzen.

Diese Beispiele sollten zeigen, wie verschiedenartig die Ausgestaltung und die Wärmebeanspruchung der elektrisch isolierenden Teile an Öfen

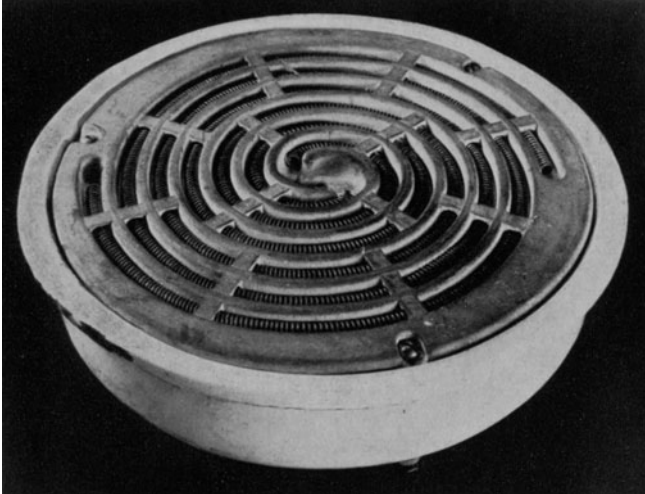


Abb. 205. Offene Strahlungskochplatte.

und Heizgeräten sein können. Der Isolierstoff für die Elektrowärme muß zunächst eine Vorbedingung erfüllen, er muß temperaturbeständig

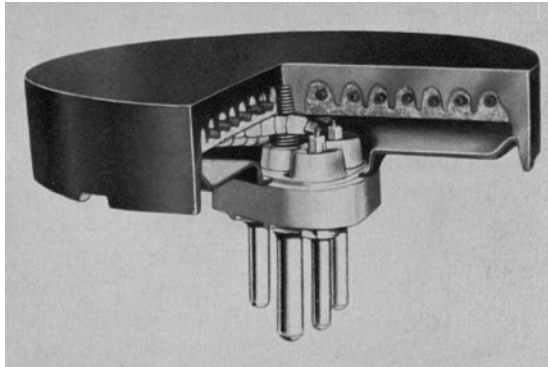


Abb. 206. Wärmeleitungs-kochplatte im Schnitt, Heizwendel in Stampfmasse.

sein. Hinzu tritt häufig die Forderung der Temperaturwechselbeständigkeit, da ein Baustoff oft nur dann verwendbar ist, wenn er schroffe Temperaturänderungen verträgt. An die Wärmeleitfähigkeit des Heiz-

leiterträgers werden die unterschiedlichsten Anforderungen gestellt; einmal soll dieser ein möglichst guter Wärmeleiter sein, das andere Mal soll er als Wärmeschutz dienen. Die Wärmeleitfähigkeit ist von der Temperatur abhängig. Von wesentlichem Einfluß ist aber auch die Porosität, die ihrerseits wieder die Neigung bedingt, Feuchtigkeit aufzunehmen. Temperaturbedingt sind auch mechanische Festigkeit und Reaktionsfähigkeit zwischen Heizleiter und Isolierkörper. Am stärksten aber ist der Einfluß der Temperatur auf die entscheidende elektrische Größe, den spez. Widerstand. Es ergibt sich also eine ganze Reihe von einander abhängiger Faktoren, welche die Auswahl eines Isolierstoffes für die Elektrowärmetechnik bestimmen.

## **2. Die physikalischen Eigenschaften der Isolierstoffe für Wärmebeanspruchung.**

### **2.1 Die Temperaturbeständigkeit.**

Voraussetzung für die Verwendbarkeit irgendeines Isolierstoffes in der Elektrowärmetechnik ist seine Temperaturbeständigkeit. Da es sich um Temperaturen handelt, die meist weit über der Bestandsgrenze organischer Stoffe liegen, kommen in diesem Gebiet ausschließlich anorganische Werkstoffe für die Isolierung in Betracht. Die Temperaturbeanspruchungen sind bei den einzelnen Geräten sehr verschieden. Bei einem Heizkissen kommt der Heizdraht kaum über  $100^{\circ}$ , bei der gewöhnlichen Kochplatte etwa auf  $600^{\circ}$ ; bei industriellen Öfen geht man mit metallischen Leitern heute bis  $1300^{\circ}$ , mit keramischen Heizstäben bis  $1500^{\circ}$ ; Laboratoriumsöfen erreichen mit Edelmetallheizkörpern  $2000^{\circ}$ , mit Graphitheizkörpern  $3000^{\circ}$  und darüber. An die Stoffe, die mit den Heizleitern in Berührung stehen und elektrisch isolieren sollen, werden also unter Umständen höchste Anforderungen hinsichtlich ihrer Temperaturbeständigkeit gestellt.

Die höchste Temperaturbeständigkeit haben die reinen Oxyde. In Tafel 16 S. 285 sind die Schmelzpunkte einiger Oxyde angegeben. Die reinen Oxyde sind keramisch außerordentlich schwer zu verarbeiten. Einmal besitzen sie an sich keine Plastizität, so daß sie schwer formbar sind, zum anderen müssen sie wegen ihres hohen Schmelzpunktes bei sehr hohen Temperaturen gebrannt werden, bis eine Sinterung und dadurch ein fester „Scherben“ erreicht wird. Gebrannte Formkörper aus reinen Oxyden werden daher nur dort für die Zwecke der elektrischen Isolierung verwendet, wo höchste Temperaturen vorkommen. Dies ist im wesentlichen auf Laboratoriumsöfen beschränkt. Für die Temperaturen der industriellen und hauswirtschaftlichen Elektrowärme reichen dagegen die Erzeugnisse der Keramik, die aus Oxydgemischen bestehen, meist aus. Oxydgemische haben in der Regel einen tieferen Schmelz- oder Sinte-

rungspunkt als die reinen Komponenten, so daß Erzeugnisse aus ihnen nicht so hohe Temperaturen aushalten wie die aus reinen Oxyden. Die Gemische lassen sich aber bei geringeren Temperaturen zu festen Körpern brennen und sind daher leichter zu verarbeiten. Aus den Schmelzpunktkurven binärer Oxydgemische geht hervor, daß meist schon ganz geringe Beimengungen eines niedriger schmelzenden Oxydes den Schmelzpunkt des Gemisches erheblich heruntersetzen. Ganz besonders wirken in dieser Weise als „Flußmittel“ die Alkalioxyde.

Es ist eine Aufgabe der Keramiker, Massen so zusammzusetzen, daß sie die für den betreffenden Verwendungszweck nötige Temperaturbeständigkeit haben und zugleich den übrigen thermischen und elektrischen Anforderungen genügen.

## 2.2 Die elektrischen Eigenschaften.

Bei den Isolierstoffen der Elektrowärmetechnik sind zwei elektrische Größen von Bedeutung, der elektrische Widerstand und die Durchschlagfestigkeit. In vielen Fällen ist die Durchschlagspannung durch den Leitungswiderstand bedingt.

Wenn in der übrigen Elektrotechnik von Isolierstoffen gesprochen wird, so versteht man darunter kurzerhand Nichtleiter, d.h. Stoffe, deren Leitungsstrom verschwindend klein ist gegenüber ihrem Verschiebungsstrom. Wie früher (vgl. S. 5 u. 143) ausgeführt, nimmt aber der spez. Widerstand aller anorganischen „Nichtleiter“ bei höheren Temperaturen so rasch ab, daß Ableitströme von ganz anderer Größenordnung zustande kommen als bei Raumtemperatur. Dadurch werden auch die Durchschlagvorgänge bei höheren Temperaturen entscheidend beeinflusst.

**2.21 Der spezifische Widerstand.** Die Temperaturabhängigkeit des spez. Widerstandes beherrscht alle Isolationsfragen in der Elektrowärmetechnik. Das Gesetz von RASCH-

HINRICHSSEN, demzufolge der Logarithmus des spez. Widerstandes dem Kehrwert der absoluten Temperatur bis auf eine additive Konstante proportional ist, ist auf S. 4 schon besprochen worden. Abb. 207 zeigt

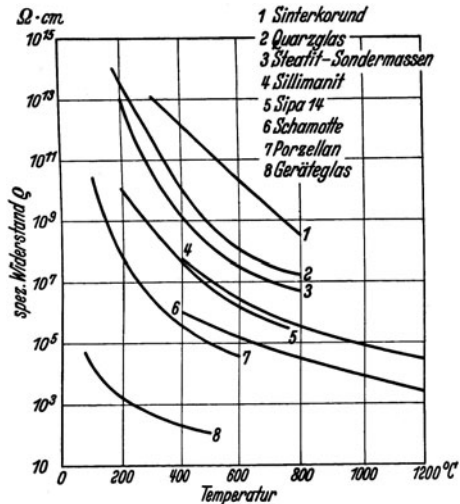


Abb. 207. Temperaturabhängigkeit des spezifischen Widerstandes keramischer Isolierstoffe.

für einige gebräuchliche Isolierstoffe den raschen Abfall des spez. Widerstandes mit wachsender Temperatur. Für die Porzellankurve ist ein mittleres Elektroporzellan angenommen. Es gibt Qualitäten, bei denen der Warmwiderstand weit tiefer, aber auch solche, bei denen er höher liegt. SIPA 14 ist ein in der Elektrowärmetechnik besonders bewährtes alkalifreies Erzeugnis mit Speckstein an Stelle von Ton als Bindemittel. Frequenta und Calit sind hochwertige Steatitmassen (vgl. S. 139). Sinterkorund ist reine Tonerde ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ).

Aus den Kurven der Abb. 207 geht hervor, daß für die Temperaturen der Elektrowärmetechnik ein eigentlicher Nichtleiter nicht existiert. Schon bei wenigen  $100^\circ$  liegen die Werte des spez. Widerstandes aller Isolierstoffe um viele Zehnerpotenzen tiefer als ihre Werte bei Raumtemperatur. Den höchsten spez. Widerstand haben die reinen Oxyde, Sinterkorund, Magnesia, geschmolzener Quarz. Die ganz alkalifreien Steatite „Frequentia“ und „Calit“ haben ebenfalls noch einen hohen Isolationswert. Je größer jedoch der Alkaligehalt ist, desto stärker ist der Abfall des Widerstandes. Der Einfluß der Erdalkalien auf die Ionenleitfähigkeit ist im I. Vortrag (vgl. S. 3) schon ausführlich behandelt worden. Es ergibt sich, daß vor allem Glas, dann aber auch Porzellan, d. h. alle mit alkalischen Flußmitteln hergestellten Massen, wegen des geringen elektrischen Widerstandes bei höheren Temperaturen für die Verwendung in der Elektrowärme ungeeignet sind. Die Keramiker haben daher möglichst alkalifreie Massen entwickelt und damit ausgezeichnete Erfolge erzielt.

**2.22 Die Durchschlagfestigkeit.** Bei Raumtemperatur ist die dielektrische Festigkeit in Volt/mm eine den Isolierstoff gut kennzeichnende Größe. Der Durchbruch tritt bei einer bestimmten Feldstärke ein. Die Durchschlagspannung ist daher, wenigstens bei mäßigen Schichtstärken, der Schichtdicke proportional. Der Leitungsstrom ist so gering, daß er den Durchschlagvorgang nicht beeinflusst. Bei höheren Temperaturen kann dagegen infolge des verminderten Isolationswiderstandes der Leitungsstrom eine Größe annehmen, die zur Selbstaufheizung des Isolierkörpers bis zum Wärmedurchschlag führt. Der Mechanismus des „Wärmedurchschlages“ ist an Hand der Abb. 15, S. 18 schon ausführlich erörtert worden. Die Selbstaufheizung bis zur Zerstörung tritt dann ein, wenn die durch Leitungsstrom in dem Isolator erzeugte JOULESche Wärme größer ist als die von der betreffenden Stelle durch Wärmeleitung oder -strahlung an die kältere Umgebung abgeführte Wärmemenge. Während der „elektrische Durchschlag“ bei einer bestimmten nur von dem Isolierstoff abhängigen Feldstärke plötzlich einsetzt, wird der Wärmedurchschlag langsam eingeleitet bei einer Spannung, die außer von der Natur des Stoffes auch von den örtlichen Bedingungen der beanspruchten Stelle abhängt. Für den Wärmedurchschlag ist also keine eindeutige Stoff-

größe als dielektrische Festigkeit anzugeben. Die Durchschlagspannung ist vielmehr von der Gestalt des Probekörpers und den äußeren thermischen Gegebenheiten bedingt, da sie die Möglichkeiten der Wärmeabführung beeinflussen. In der Wärme lassen sich daher verschiedene Isolierstoffe nur unter genau gleichen Versuchsbedingungen auf Durchschlagfestigkeit vergleichen.

Das allmähliche Einsetzen des Wärmedurchschlages ist an einem einfachen Laboratoriumsversuch leicht zu zeigen. Gewisse Gläser haben schon bei niedrigen Temperaturen einen geringen Widerstand. Wenn man ein Glasstäbchen von wenigen Zentimeter Länge, in dessen Enden Zuleitungsdrähte eingeschmolzen sind, in Reihe mit einem Schutzwiderstand an 220 V Wechselspannung anschließt, so ist mit einfachen Mitteln ein Leitungsstrom nicht festzustellen. Wird das Stäbchen mit der Gasflamme auf einige 100° erwärmt, so kann man bereits mit einem gewöhnlichen Strommesser einen Leitungsstrom von einigen Zehntel Ampere feststellen. Dieser Leitungsstrom reicht aus, um das Stäbchen weiter hochzuheizen. Die Temperaturzunahme kann am Glühen des Stäbchens beobachtet werden. Schaltet man vor dem Durchbrennen aus, so kühlt sich das Stäbchen wieder ab. Schaltet man wieder ein, ehe es eine bestimmte untere Grenztemperatur erreicht hat, so reicht der Leitungsstrom noch aus, um den Probestab ohne äußere Wärmezufuhr wieder hochzuheizen. Läßt man dagegen den Stab nur etwas unter diese Grenztemperatur (die außer vom Material von der Form des Stabes und der Spannung abhängt) abkühlen, so tritt keine Selbstaufheizung mehr ein.

Daß der Wärmedurchschlag lediglich eine Frage der Wärmeleistung ist, kann aus der früher bereits aufgeführten Arbeit von ALBERS-SCHÖNBERG und SCHUSTERIUS<sup>1</sup> gefolgert werden. In Abb. 55, S. 51 waren die Meßergebnisse dargestellt, die an Probmassen mit verschiedenem Kalifeldspatgehalt gewonnen wurden, und zwar sind die Durchschlagspannungen und die spez. Widerstände als Funktion der Temperatur für fünf verschiedene Feldspatgehalte zwischen 5 und 40% angegeben. Vergleicht man

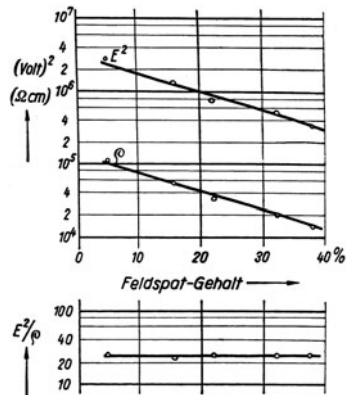


Abb. 208. Abhängigkeit der Durchschlagleistung vom Feldspatgehalt.

die Ergebnisse abhängig von dem Feldspat- (d. h. Alkali-) Gehalt bei einer bestimmten Temperatur, legt man also einen Schnitt durch die beiden Kurvenscharen der Abb. 55 etwa bei 600° C, so erhält man das

<sup>1</sup> Vgl. 1. Vortrag S. 53.

in Abb. 208 dargestellte Ergebnis. In logarithmischem Maßstab ist außer der Kurve des spez. Widerstandes  $\rho$  nicht die Kurve der Durchschlagspannung  $E$ , sondern von  $E^2$  aufgetragen.

Zunächst ergibt sich nebenbei aus der geraden Form der  $\rho$ -Kurve, daß die Leitfähigkeit  $1/\rho$  dem Feldspatgehalt proportional ist. Daß die  $E^2$ -Kurve ebenfalls linear und außerdem der  $\rho$ -Kurve parallel verläuft, führt zu dem Schluß, daß das Verhältnis  $E^2/\rho$  konstant, d. h. unabhängig von dem Feldspatgehalt oder den Stoffgrößen ist.  $E^2/\rho$  bedeutet aber — bis auf einen Maßstabfaktor — nichts anderes als die in der Durchschlagstrecke erzeugte und in Wärme umgesetzte elektrische Leistung. Die Werte  $E^2/\rho$  sind auf dem unteren Teil der Abbildung noch einmal dargestellt. Die einzelnen Punkte liegen recht gut auf der waagerechten Geraden.

Diese an gleichgeformten Versuchsstücken aus verschiedenen Massen angestellten Messungen zeigen also, daß hier der Durchschlag von keiner Materialgröße, sondern lediglich von der Wärmeleistung bestimmt ist. Daraus ist der Schluß zu ziehen, daß man zur Kennzeichnung der elektrischen Eigenschaften von Isolierstoffen für die Wärmetechnik nicht Durchschlagfeldstärken angeben sollte, sondern nur den spez. Widerstand des Stoffes abhängig von der Temperatur.

Ganz allgemein kann man für unser Gebiet sagen, daß bei geringen Temperaturen der elektrische, bei höheren Temperaturen der thermische Durchschlag die elektrische Festigkeit begrenzt. Die Durchschlagspannung ist also für einen gegebenen Probekörper bei geringen Temperaturen durch die Feldstärke bestimmt und ist unabhängig von der Temperatur, während sie bei höheren Temperaturen mit wachsender Leitfähigkeit, also mit steigender Temperatur sinkt. Der Übergang von dem temperaturunabhängigen Gebiet des elektrischen Durchschlages zu dem Gebiet des Wärmedurchschlages liegt bei um so höheren Temperaturen, je weniger Alkaliionen der Isolierstoff enthält. Für die in der Elektrowärme verwendeten Stoffe liegt der Übergang meistens schon bei wenigen  $100^\circ$ , so daß praktisch immer mit dem Wärmedurchschlag zu rechnen ist.

Im Bereich des elektrischen Durchschlages war die Durchschlagspannung proportional der Dicke der Isolierschicht, wenigstens bei nicht zu großen Schichtstärken. Der Vorgang des Wärmedurchschlages macht es verständlich, daß in diesem Bereich die Durchschlagspannung nicht proportional mit der Schichtdicke steigt. Eine Erhöhung der Sicherheit erfordert hier vielmehr eine vielmal größere Verstärkung der Isolationsdicke, und zwar um so mehr, je höher die Temperatur liegt. Es ist daher bei hohen Temperaturen zwecklos, die Durchschlagsicherheit einer Anordnung durch Verstärken einer Isolationsschicht erhöhen zu wollen. Die Elektrowärmetechnik bleibt daher mit den in der eigentlichen Wärme-



zone liegenden Teilen praktisch auf das Niederspannungsgebiet beschränkt.

In manchen Fällen ist es wichtig, an gegebenen Musterstücken die Durchschlagspannung abhängig von der Temperatur zu bestimmen. Hier kann die Messung des Verlustfaktors gute Dienste leisten, da sie ermöglicht, die Durchschlagspannung zu ermitteln ohne das Probestück zu zerstören, so daß sämtliche Meßpunkte mit ein und demselben Probestück aufgenommen werden können. Die Durchschlagspannung stellt den Punkt dar, an dem gerade Selbstaufheizung in dem Maße einsetzt, daß sie zur Zerstörung führt. Die Durchschlagspannung ist also die

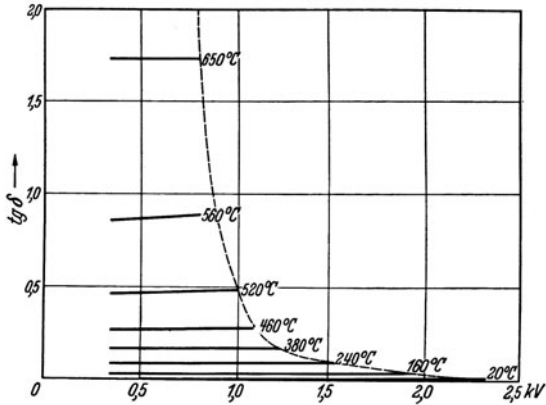


Abb. 209. Verlustwinkel der Isolation eines Backerrohres bei verschiedenen Temperaturen.

Grenze eines stabilen Zustandes. Wird der Verlustfaktor mit der SCHERING-Brücke (vgl. S. 85) gemessen und dabei langsam die Spannung am Versuchsstück gesteigert, so tritt an einem Punkt der Zustand ein, daß der Verlustfaktor  $\text{tg } \delta$  keinen stabilen Wert mehr hat, also keine Brückeneinstellung mehr möglich ist. Sowie dieser Punkt erreicht ist, wird abgeschaltet, ehe die Selbstaufheizung bis zum Durchbruch fortgeschritten ist. Auf diese Weise sind bei verschiedenen Temperaturen die in Abb. 209 dargestellten  $\text{tg } \delta$ -Kurven abhängig von der Spannung an der Isolation eines Backerrohres aufgenommen. Die  $\text{tg } \delta$ -Kurven steigen mit der Spannung kaum merklich an, brechen aber bei einer bestimmten Spannung plötzlich ab. Diese Stelle entspricht der Durchschlagspannung bei der betreffenden Temperatur. In Abb. 210 ist diese Durchschlagspannung abhängig von der Temperatur herausgezeichnet.

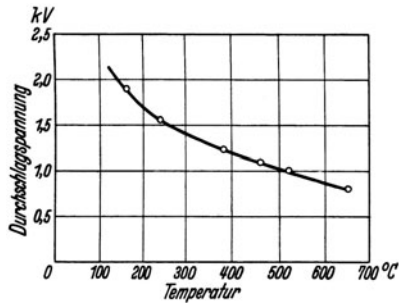


Abb. 210. Durchschlagspannung eines Backerrohres in Abhängigkeit von der Temperatur.

Für die Isolierstoffe der Elektrowärmetechnik ergibt sich also als beherrschende Eigenschaft die starke Abnahme des elektrischen Wider-

standes mit wachsender Temperatur und für den stofflichen Aufbau die Folgerung, daß eine Masse um so weniger für höhere Temperaturen geeignet ist, je mehr Alkali sie enthält, da der Alkaligehalt sowohl den elektrischen Widerstand wie den Temperatureinfluß in ungünstigem Sinne beeinflußt.

### 2.3 Die Wärmeleitfähigkeit.

Nach den elektrischen spielen die rein thermischen Eigenschaften und darunter zunächst die Wärmeleitfähigkeit eine große Rolle. Sie ist einmal abhängig von dem Stoff selbst, dann aber vor allem von der Art seiner Verarbeitung, ob gebrannt oder gestampft bzw. gepreßt, von der Brenntemperatur und der Porosität. Am wenigsten läßt sich bisher über den Einfluß der chemischen Zusammensetzung auf die Wärmeleitfähigkeit sagen. Über den morphologischen Aufbau ist bekannt, daß kristalline Körper verhältnismäßig hohe mit der Temperatur fallende, amorphe Stoffe niedrige mit der Temperatur steigende Wärmeleitfähigkeit haben. Die Wärmeleitfähigkeit eines keramischen, dicht gebrannten Körpers ist also davon abhängig, welche von beiden Modifikationen vorherrschend ist.

Es liegt auf der Hand, daß poröse Körper eine geringere Wärmeleitfähigkeit haben als dichtgebrannte Stücke, da die Luftporen die Wärme schlechter leiten als der dichte Baustoff. Die Wärmeisolierung der einzelnen Luftporen wird aber bei höheren Temperaturen z.T. wieder aufgehoben, da die mit der 4. Potenz der Temperatur wachsende Wärmeübertragung durch Strahlung hinzukommt. Infolgedessen nimmt bei porösen Steinen die Wärmeleitfähigkeit mit der Temperatur zu. Der Temperatureinfluß ist bei gleicher Gesamtporosität um so größer, je größer die einzelnen Poren sind. Kleine Poren, also viele Porenwände, wirken wie viele hintereinander geschaltete Strahlungsschirme und vermindern den Einfluß der Strahlung. Wird für hohe Temperaturen geringe Wärmeleitung verlangt, so ist ein Stein mit hoher Porosität aber gleichzeitig möglichst kleinen Poren zu wählen.

Je höher die Brenntemperatur einer keramischen Masse ist, desto fester wird durch Sinterung der Verband der einzelnen Körner. Damit steigt die Wärmeleitfähigkeit.

In Abb. 211 sind für einige gebräuchliche keramische Massen die Wärmeleitzahlen in ihrer Abhängigkeit von der Temperatur aufgetragen. Die reinen kristallinen Oxide, die ohne wesentlichen Anteil glasiger Bindemittel gesintert sind, haben die höchsten Werte mit stark fallendem Temperaturbeiwert. Die Steine mit Tonsubstanz und verhältnismäßig großer Porosität liegen viel tiefer und zeigen bereits steigenden Temperaturbeiwert.

Die Isoliersteine und Wärmeschutzmassen liegen mit ihrer Wärmeleitfähigkeit um eine ganze Zehnerpotenz tiefer. Das Ausgangsmaterial für hochwertige temperaturbeständige Wärmeschutzstoffe ist Kieselgur oder Infusorienerde, eine Ablagerung von Meereralgen aus der Tertiärzeit. Diese fossilen Überreste haben ihre zellenähnliche Struktur behalten und bilden mit ihren zu 75% aus Kieselsäure bestehenden winzigen Schalenpanzern den feinporösen Aufbau, wie er für eine möglichst geringe Wärmeleitung nötig ist. Die daraus geformten und gebrannten Steine haben in ihrer leichtesten Ausführung ein Raumgewicht von kaum  $400 \text{ kg/m}^3$ ,

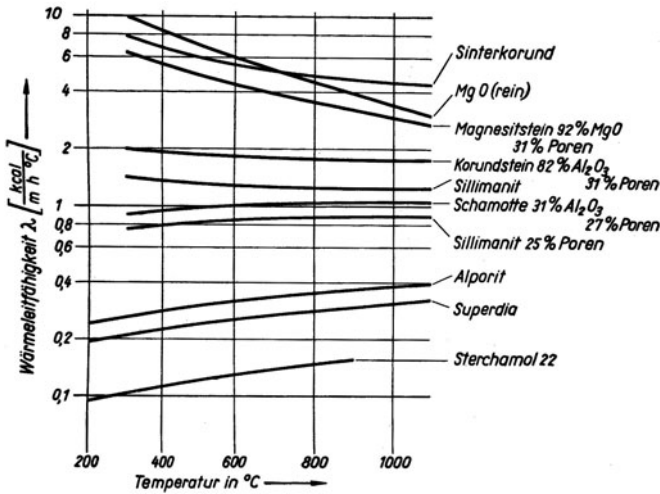


Abb. 211. Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$  von Keramischen Baustoffen in Abhängigkeit von der Temperatur.

die Wärmeleitfähigkeit liegt bei Raumtemperatur um  $0,08 \text{ kcal/mh}^\circ\text{C}$  und steigt auf etwa das Doppelte bei  $800^\circ$ . Diese ganz leichten Wärmeisoliersteine haben natürlich nur eine geringe Festigkeit und sind eigentlich nur für Hintermauerung zu verwenden, so daß sie kaum für elektrische Isolierung beansprucht werden. Immerhin sind auch Konstruktionen zu finden, bei denen die Heizleiter in Rinnen unmittelbar auf diesen Kieselgursteinen liegen. Eine solche Bauart hat den Vorteil außerordentlich geringer Wärmespeicherung und niedriger Wärmeverluste. Die elektrische Isolierfähigkeit reicht aus, da eine solche Bauart nicht für sehr hohe Temperaturen gebraucht wird. Zu beachten ist aber, daß sowohl das natürliche Kieselgurvorkommen, als auch das Brennverfahren Spuren von Schwefel in den Stein bringen kann, die für den nickelhaltigen Heizleiter außerordentlich schädlich sind.

An vielen Stellen wird der elektrische Heizleiter nicht von einem ge-

brannten keramischen Körper getragen, sondern in eine Stampfmasse eingebettet, die nachher getrocknet und gegebenenfalls gebrannt wird. In all diesen Fällen der „eingebetteten“ Heizleiter kommt es darauf an, daß die Einbettmasse eine hohe Wärmeleitfähigkeit hat, damit der Heizleiter die in ihm erzeugte Wärme mit möglichst geringem Wärmefälle nach außen abgeben kann. Über Einbettmassen sind leider kaum systematische Arbeiten bekannt geworden. Vielfach hüten die einzelnen Firmen ihre Kenntnisse als Fabrikationsgeheimnis. Über den stofflichen Aufbau kann man sagen, daß die Einbettmassen im Kleingerätebau — Kochplatten u. dgl. — meist auf MgO-Basis aufgebaut sind, da MgO angeblich die höchste Wärmeleitzahl hat. Im Ofenbau bestehen die Einbettmassen dagegen meistens aus Korund mit geringen Tonzusätzen, da auch Korund eine hohe Wärmeleitzahl besitzt. Die Wärmeleitfähigkeit einer Einbettmasse wird aber wahrscheinlich sehr viel stärker von der Art der Herstellung, der Pressung und der Einbrenntemperatur abhängen, als von dem Grundstoff. Von größter Bedeutung ist in diesem Zusammenhang die richtige Körnung der Masse. Zu grobe Körnung gibt ein zu poröses Gefüge und nicht nur geringe mechanische Festigkeit, sondern auch schlechte Leitfähigkeit. Sehr feine Körnung ergibt zu wenig Wärmedehnungsmöglichkeit, so daß das Futter reißt. Es wird daher zweckmäßig eine Mischung von verschiedenen Körnungen verwendet und zwar so, daß etwa zur Hälfte mittleres, zu ein Viertel grobes und ein Viertel feines Korn verarbeitet werden. Die pulvrigen Bestandteile werden ausgeschieden.

Da die Einbettmasse zugleich der elektrische Isolator ist, muß auf hohen Isolationswiderstand geachtet werden, denn bei der vollkommenen Einbettung eines Heizwendels ist die Fläche für den Übertritt von Ableitungs- oder Querströmen viel größer als bei offen aufliegendem Wendel. Alkalische Flußmittel, Wasserglas u. dgl., die eine leichtere Formung und Sinterung bewirken würden, sind daher zu vermeiden, da sie den Ableitwiderstand herabsetzen. Dagegen ist ein hohes Einbrennen anzustreben, da, wie schon bei den feuerfesten Steinen erwähnt, die Wärmeleitfähigkeit mit der Brenntemperatur, d. h. mit der Durchsinterung wächst.

#### **2.4 Die Temperaturwechselbeständigkeit.**

Von großer Wichtigkeit für alle in der Wärmetechnik verwendeten Baustoffe ist ihr Widerstand gegen schroffen Temperaturwechsel. Die Temperaturwechselbeständigkeit ist eine Stoffeigenschaft, die nicht unmittelbar gemessen werden kann. Sie ist sicher um so größer, je kleiner der lineare Ausdehnungskoeffizient  $\alpha$  und je kleiner der Elastizitätsmodul  $E$  ist. Die Zugfestigkeit  $G$  wird auch eine gewisse Rolle spielen; sie wird die Wechselbeständigkeit erhöhen. Wichtig ist außerdem noch

das Vermögen des Stoffes, örtliche Temperaturunterschiede innerhalb des Stoffes auszugleichen. Es wird also nicht nur auf die Wärmeleitfähigkeit ankommen, sondern auf die sog. Temperaturleitzahl  $\alpha = \frac{\lambda}{c \cdot \gamma}$ , in der außer der Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$  auch die „Speicherfähigkeit“ in  $c \cdot \gamma$  enthalten ist ( $c$  spezifische Wärme,  $\gamma$  Dichte).

Für Gläser haben SCHOTT und WINKELMANN die Ergebnisse zahlreicher Messungen in einer Beziehung dargestellt, in welcher der „thermische Widerstandskoeffizient“  $W$  die oben erwähnten Faktoren in folgender Form enthält:

$$W = \frac{G}{E \cdot \alpha} \sqrt{\alpha} .$$

Für das amorphe Glas gibt diese Gleichung die Erfahrung gut wieder. Ihre Gültigkeit auf keramischem Gebiet ist jedoch umstritten. Die darin enthaltenen Größen haben bei einem stofflich und räumlich inhomogenen Körper keinen genau definierten Sinn mehr, so daß diese Beziehung zumindest nur noch qualitativ zu werten ist. Für dicht gebrannte Stoffe mag sie noch ihre Geltung haben. Bei stark porösen Stoffen sind der Grad der Porosität und die Porengröße sicher von Einfluß auf die Temperaturwechselbeständigkeit, so daß hier der Zusammenhang unübersichtlicher sein dürfte. Die Porosität schafft Ausgleichsmöglichkeiten für örtliche Spannungen, so daß der poröse Körper im allgemeinen wechselbeständiger ist als der dicht gebrannte. Systematische Arbeiten hierüber liegen nicht vor. Die Temperaturwechselbeständigkeit wird in der Keramik durch Abschreckversuche bestimmt, die aber nur eine rohe Beurteilung ermöglichen. Der Probekörper wird auf eine bestimmte Temperatur im Ofen erhitzt und dann rasch an Luft abgekühlt. Die Zahl der Abschreckungen, die ein Stück aushält, oder auch der Gewichtsverlust durch Abplatzen von Teilen bei einer bestimmten Zahl von Abschreckungen sind relative Vergleichsmaßstäbe. Die beste Prüfung ist immer die Haltbarkeit im Betrieb.

Von den Größen, die einen Einfluß auf die Temperaturwechselbeständigkeit haben, ist der thermische Ausdehnungskoeffizient wohl die entscheidende. Die Keramik hat daher auch mit Erfolg ihre Entwicklungsarbeit auf diesen Punkt gerichtet und durch geeignete Zusammensetzung der Massen Baustoffe für die Wärmetechnik mit stark vermindertem Ausdehnungskoeffizienten geschaffen, die eine ausgezeichnete Temperaturwechselbeständigkeit haben. In Zahlentafel 17 S. 286 sind die linearen thermischen Ausdehnungskoeffizienten für einige keramische Isolierstoffe zusammengestellt.

Die betriebsmäßige Brauchbarkeit hängt stark von der Formgebung der keramischen Stücke ab. Plötzliche Übergänge von starken zu schwachen Querschnitten, scharfe Winkel sind zu vermeiden, da sie bei

ungleichmäßiger Erwärmung Wärmespannungen begünstigen. Gerade bei elektrisch beheizten Öfen und Geräten treten oft große Temperaturunterschiede in benachbarten Teilen an den Heizkörperträgern auf. Wie bei metallischen Gußstücken auf Schwindung und Ausdehnung bei der Formgebung Rücksicht genommen wird, so hat auch der Keramiker gelernt, die Wärmeausdehnung bei der Formgebung zu beachten. Abb. 212

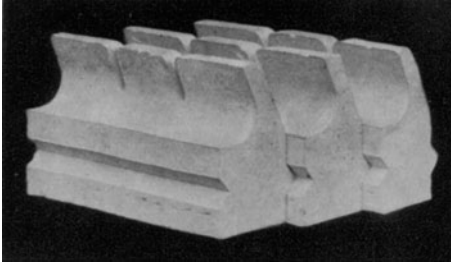


Abb. 212. Ofensteine aus Schamotte, wendeltragende Zunge mit Ausdehnungsschlitzten. (Die Steine liegen in der Abbildung auf dem Rücken.)

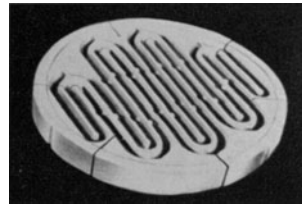


Abb. 213. Glühkochplatte aus Magnesolit mit Dehnungsschlitzten.

zeigt einige Nischensteine für Heizwendel. Der Stein bildet die Wand des Ofenraumes; auf der Zunge liegt das Heizwendel. Die Zunge wird also wesentlich heißer als der in die Mauer eingebundene Teil des Steines. Deshalb ist die Zunge mit Ausdehnungsschlitzten versehen. Ähnliche Dehnungsschlitzte sind auf der Glühkochplatte in Abb. 213 zu erkennen.

### 3. Die verschiedenen Isolierstoffe und ihre Verwendung.

#### 3.1 Die hochschmelzenden reinen Oxyde.

Wenn nun die einzelnen Isolierstoffe nach ihrer besonderen Verwendung besprochen werden, so soll zunächst die Reihenfolge nach ihrer Temperaturbeständigkeit eingehalten werden. Es war oben erwähnt, daß die höchste Temperaturbeständigkeit den reinen Oxyden zukommt (Tafel 16 S. 285). Es war aber auch bereits angedeutet, daß diese reinen Oxyde nur ein beschränktes Anwendungsgebiet finden. Die Rohstoffe sind in der geforderten Reinheit teuer, die Verarbeitung ist ebenfalls kostspielig. Der Kostenaufwand für diese höchsten Temperaturbeanspruchungen gewachsenen Stoffe ist nur da gerechtfertigt, wo die Vorzüge dieser Stoffe ausgenützt werden und billigere nicht ausreichen.

Technisch höchste Temperaturen werden im TAMMANN-Ofen erzielt, bei dem ein Kohle- oder Graphitrohr zwischen zwei wassergekühlte Kontaktbacken eingespannt ist und den Kurzschlußwiderstand eines Hochstromtransformators bildet. In dem Kohlerohr werden Temperaturen

bis  $3000^{\circ}$  erreicht. Den eigentlichen Arbeitsraum des Ofens bildet ein keramischer Tiegel, der das Schmelzgut von dem Kohlerohr trennt und elektrisch isoliert. Ähnliche Temperaturen kann der Hochfrequenz-Induktionsofen liefern. Das elektrisch leitende und durch Induktionsströme erhitzte Schmelzgut wird hier von einem keramischen Tiegel aufgenommen, der im Innern einer mit Hochfrequenz gespeisten Zylinder-spule steht.

Ein weiterer Vertreter der elektrischen Hochtemperaturöfen ist der Rohrofen mit Molybdänheizung. Wegen der leichten Oxydierbarkeit des Molybdäns muß dieses unter Schutzgas stehen. Zu diesem Zweck müssen die Rohre, zwischen die der Heizkörper eingebaut ist, vollkommen gasdicht sein, eine Forderung, die bei so hohen Temperaturen nur von wenigen keramischen Stoffen erfüllt wird.

Auch die kleinen Laboratoriumsöfen mit Edelmetallheizung stellen ziemlich hohe Anforderungen an die Temperaturbeständigkeit der keramischen Isolierteile. Mit Platin geht man bis  $1400^{\circ}$ , mit Platin-Iridium bis  $1500^{\circ}$  und mit reinem Iridium sogar bis  $2000^{\circ}$  C.

Ein weiteres Anwendungsgebiet für die Hochtemperaturkeramik ist das Pyrometerschutzrohr, das zum Schutz und zur Isolierung von Thermoelementen dient. Hier treten die verschiedensten Beanspruchungen auf. Das Schutzrohr muß gasdicht sein, wenn es in Flammgasen verwendet wird, es muß in höchstem Maß temperaturwechselbeständig sein, wenn es für Tauchpyrometer in Schmelzen gebraucht wird.

An oberster Stelle der Temperaturbeständigkeit steht Thoriumdioxid, das erst seit den letzten Jahren überhaupt verarbeitet werden kann. Man brennt heute aus  $\text{ThO}_2$  einen dichten transparenten Scherben, der je nach Verwendungszweck bis weit über  $2500^{\circ}$  gebraucht werden kann, wenn auch die Druckerweichung schon bei  $1900^{\circ}$  beginnt. Das Material ist aber wegen seiner verhältnismäßig großen Wärmeausdehnung sehr empfindlich gegen Temperaturwechsel und wird darum nur in Ausnahmefällen verwendet.

Gegenstände aus Zirkondioxid können bis  $2500^{\circ}$  benutzt werden, der Scherben ist jedoch nicht so dicht wie bei anderen Oxyden. Außerdem nimmt die elektrische Leitfähigkeit bei hohen Temperaturen sehr rasch zu, so daß dieses Material bei höchsten Temperaturen ein schlechter Isolator wird. Die Leitfähigkeit nimmt so stark zu, daß sich  $\text{ZrO}_2$  im direkten Lichtbogen schmelzen läßt. Andererseits sind z. B. im Kohlerohr-Kurzschlußofen, der die höchsten Temperaturen zu erzeugen gestattet, die Spannungen so gering, daß Zirkonrohre und Tiegel trotz ihrer hohen elektrischen Leitfähigkeit darin verwendet werden können.

Berylliumoxyd ist bis über  $2200^{\circ}$  C gasdicht. Seine große Wärmeleitfähigkeit verleiht ihm eine ungewöhnlich hohe Widerstandsfähigkeit

gegen schroffen Temperaturwechsel. Dabei hat  $\text{BeO}$  auch bei hohen Temperaturen noch einen sehr hohen Isolationswiderstand.  $\text{BeO}$  ist gegen basische Angriffe sehr widerstandsfähig, gegen Säuren dagegen empfindlich. Das Material eignet sich in vielen Fällen für hoch beanspruchte Pyrometerschutzrohre.

Diese drei Oxyde werden ihrer schweren Verarbeitbarkeit und ihres hohen Preises wegen nur in Ausnahmefällen verwendet. Auch die nächsten beiden in der Reihe der reinen Oxyde,  $\text{MgO}$  und  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , werden als gebrannte Formkörper nur in Sonderfällen als Isolatoren in der Elektrowärmetechnik herangezogen. Sie bilden aber die Grundstoffe für die meisten Einbettmassen und außerdem zusammen mit Kieselsäure ( $\text{SiO}_2$ ) die Hauptbestandteile aller zusammengesetzten keramischen Massen.

Aus reiner Magnesia ( $\text{MgO}$ ) können sowohl dichte als auch poröse Scherben gebrannt werden. Die dichte Form ist bis  $2400^\circ$ , die poröse bis  $2200^\circ$  verwendbar. Magnesiumoxyd wird von Kohle verhältnismäßig leicht reduziert, wobei das reduzierte Magnesium verdampft. In Kohlerohr- oder Kohlegriesöfen ist daher Magnesiumoxyd nicht zu verwenden. Dagegen ist  $\text{MgO}$  ein wichtiges Hilfsmittel überall da, wo basischer Schlackenangriff zu erwarten ist, da es selbst stark basisch ist.  $\text{MgO}$  wird daher für Schmelztiegel im Hochfrequenzofen und vor allem für Pyrometerschutzrohre für Tauchpyrometer verwendet. In Bleibädern ist es neben Sinterkorund das widerstandsfähigste Material.

Wegen seiner hohen Wärmeleitfähigkeit wird Magnesiumoxyd vielfach als Stampfmasse zum Einbetten von Heizwendeln in Kochplatten und in Rohrheizkörpern verwendet. Hierüber wird bei den besonderen Ausführungsformen noch ausführlicher gesprochen (vgl. S. 276).

Unter den keramisch gebundenen, reinen Oxyden hat  $\text{Al}_2\text{O}_3$  als Sinterkorund die weiteste Verwendung als Isolierkörper gefunden. Das wesentliche ist hier — gegenüber anderen korundhaltigen Massen —, daß das reine Oxyd ohne jedes fremde Bindemittel zu einem völlig dichten kristallinen Körper gesintert ist. Dies verleiht dem Stoff Eigenschaften, die ihn gegenüber anderen tonerhaltigen Massen herausheben.

Die Formkörper werden im allgemeinen im Gießverfahren hergestellt. Da die Masse keine Tonsubstanz enthält und frei von Alkalien ist, wird ihr durch Säurezusatz die schlickerartige Bindung und Gießfähigkeit verliehen. Bei kleinen Formstücken kann auch das Naßpreßverfahren (vgl. S. 124) angewandt werden. Sinterkorund wird bei etwa  $1800^\circ\text{C}$  gebrannt und ist nach dem Brennen außerordentlich hart. Der Erweichungsbeginn liegt bei  $1730^\circ$ . Bis dahin ist der Scherben gasdicht. Die rein kristalline Struktur verleiht dem Material eine sehr hohe Wärmeleitfähigkeit (vgl. Abb. 211), dazu aber auch bei hohen Temperaturen einen ungewöhnlich hohen elektrischen Isolationswiderstand (vgl.



Abb. 207). Sinterkorund ist chemisch außerordentlich widerstandsfähig und daher besonders für Pyrometerschutzrohre und Schmelztiegel geeignet. Es ist das widerstandsfähigste Material gegen Bleioxyd. Trotz des dichten Scherbens hat Sinterkorund eine gute Temperaturwechselbeständigkeit, die wesentlich höher ist, als die von Steatit und Porzellan. Wegen dieser hervorragenden Eigenschaften ist Sinterkorund besonders für Zündkerzen geeignet und viel verwendet.

### 3.2 Geschmolzener Quarz.

Den Übergang von den reinen kristallinen Oxyden zu den zusammengesetzten keramischen Stoffen, die aus Kristalliten mit glasiger Bindung bestehen, bildet der geschmolzene Quarz ( $\text{SiO}_2$ ). Die kristalline Kieselsäure als Bergkristall oder Quarzsand hat einen Schmelzpunkt von  $1713^\circ \text{C}$ . Die geschmolzene Kieselsäure kann als einziges der reinen Oxyde in zähflüssigem Zustand wie ein Glas verformt werden. Der geschmolzene Quarz bildet daher die Brücke von den keramisch verarbeiteten Oxyden zu den Gläsern.

Für Elektrowärmezwecke wird weniger das aus reinem Bergkristall erschmolzene klare Quarzglas, als vielmehr das durch kleine Bläschen getrübte Quarzglas verwendet, das aus reinem Quarzsand erschmolzen wird. Die Reinheit des Rohstoffes muß 99,7%  $\text{SiO}_2$  betragen. Es sind im wesentlichen zwei Schmelzverfahren in Gebrauch. Das alte Verfahren von BOTTOMLEY, HUTTON und PAGET, nach dem um einen als Heizkörper dienenden Graphitkern der gemahlene Quarzsand aufgeschüttet und von innen heraus geschmolzen wird, und das Verfahren der Silica Syndicate Ltd., London, nach dem das Quarzpulver auf einen Quarzstab aufgestreut und durch einen Lichtbogen von außen aufgeschmolzen wird. Das erste Verfahren wird meist für Quarzglas, das zweite für klares Quarzglas angewandt.

Der sehr kleine Ausdehnungskoeffizient ( $\alpha = 0,5 \cdot 10^{-6}$ ) ist die hervorstechendste Eigenschaft des geschmolzenen Quarzes, die ihm eine außerordentliche Widerstandsfähigkeit gegen schroffsten Temperaturwechsel verleiht. Quarzglas wie auch Quarzglas sind vollkommen dicht. Die Poren bei Quarzglas sind keine Luftbläschen, sondern luftleere Hohlräume, die sich durch Abkühlung von Siliziumdampf bilden. Die Wärmeleitfähigkeit ist nicht besonders groß, dafür aber ist sowohl Quarzglas als auch Quarzglas für die langwellige Wärmestrahlung bis zu  $6 \mu$  recht gut durchlässig. Der hohe elektrische Widerstand ist oben schon genannt worden (vgl. Abb. 207).

Der amorphe Zustand ist nicht stabil. Bei langandauernder Erhitzung auf höhere Temperaturen kann bei geschmolzenem Quarz „Entglasung“ eintreten. Bei tiefen Temperaturen tritt die Rekrystallisation aber nicht von selbst ein. Erst bei etwa  $1100^\circ$  setzt eine ganz langsame

Kristallkeimbildung ein, die mit höheren Temperaturen rasch zunimmt. Dadurch wird das amorphe Glas langsam in die metastabile  $\alpha$ -Cristobalithphase umgewandelt. Solange vollkommene Abkühlung vermieden wird, verliert der Quarzkörper dadurch noch nicht seine Beständigkeit, da die Umwandlung ohne wesentliche Volumenveränderung vor sich geht. Bei der Abkühlung unter  $230^\circ$  tritt aber eine weitere Umwandlung von  $\alpha$ -Cristobalit in  $\beta$ -Cristobalit ein, die mit einer Volumenvergrößerung von 3—5% verbunden ist. Dadurch erst wird der Quarzkörper brüchig. Wird der Quarzkörper jedoch nur bis höchstens  $1100^\circ$  erhitzt, so kann er ohne Schaden beliebig oft abgekühlt werden, da dann die Cristobalit-Modifikation noch nicht vorhanden ist. Durch alkalische Einwirkungen wird die Kristallkeimbildung und damit die Entglasung sehr beschleunigt und beginnt dann schon bei tieferen Temperaturen.

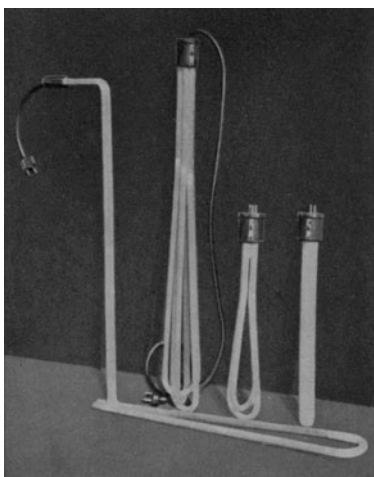


Abb. 214. Säurefeste Tauchsieder aus Quarzglas.

Zu erwähnen ist noch, daß  $\text{SiO}_2$  mit  $\text{FeO}$  eine sehr tief schmelzende Schlacke bildet. Es ist also bei Verwendung von Quarzglas bei höheren Temperaturen peinlich zu vermeiden, daß eine Berührung mit Eisenoxyd eintreten kann. Hocheisenhaltige Heizleiter-Legierungen sind bei Quarzunterlage nur dann zu verwenden, wenn genügend sicher ist, daß an den Berührungsstellen Temperaturen von  $1200^\circ$  auch in ungünstigen Fällen nicht auftreten können.

Wegen seiner großen Widerstandsfähigkeit gegen chemische Angriffe wird Quarzglas für viele Zwecke in der chemischen Industrie verwendet in Form von Tiegeln, Kesseln, Rohren. Der hohe Isolationswiderstand des Quarzes wird bei elektrischer Beheizung solcher Geräte häufig in der Weise ausgenützt, daß außen auf den Quarzkörper unmittelbar eine Heizwicklung aufgebracht wird.

Die geringe Wärmeausdehnung und kaum zu übertreffende Temperaturwechselbeständigkeit geben auch die Möglichkeit, aus Quarzglas säurebeständige Tauchsieder zu bauen. Damit kann die elektrische Innenheizung in Fällen angewandt werden, wo sonst kein Material beständig wäre. In Abb. 214 sind einige Ausführungsformen von säurebeständigen Tauchsiedern aus Quarzglas dargestellt, die bis zu  $600^\circ \text{C}$  verwendet werden können. Als Heizdraht dient Chromnickel.

Eine Anwendung von Quarzglas ist noch zu nennen, die insofern zur Elektrowärmetechnik gehört, als sie die elektrische Temperaturmessung betrifft. Bei Widerstandsthermometern wird der Platindraht, dessen Widerstandsänderung zur Temperaturmessung verwendet wird, auf einen Quarzdorn aufgewickelt und dann mit einem dünnen Quarzglasröhrchen überzogen, das nachträglich aufgeschmolzen wird, so daß die Platinspirale vollkommen in Quarzglas eingebettet ist. Das Quarzröhrchen hat nur einige Zehntelmillimeter Wandstärke, damit der Wärmeübergang von außen auf die Meßwicklung möglichst verzögerungsfrei erfolgt. Trotzdem muß das Quarzröhrchen einer hohen Isolationsprüfung auch bei einer Betriebstemperatur von einigen hundert Grad standhalten, da die geringste Ableitung die Meßresultate fälschen würde. Infolge der geringen Ausdehnung des Quarzglases ist das Thermometer gegen schroffen Temperaturwechsel vollkommen unempfindlich.

### 3.3 Fest gebrannte keramische Massen.

Alle bisher behandelten Stoffe haben als Spezialmassen zu gelten, die nur in besonderen Fällen gebraucht werden. Die weitaus breiteste Verwendung haben die eigentlichen keramischen Massen, d. h. Gemenge aus  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MgO}$  und  $\text{SiO}_2$  gefunden.

**3.31 Schamotten.** Im industriellen Ofenbau ist man auch für Heizwiderstandsträger von dem gewöhnlichen Schamottestein ausgegangen, der für die meisten Fälle eine genügende Isolierfähigkeit hat und infolge seines grobporösen Aufbaues verhältnismäßig unempfindlich gegen Temperaturwechsel ist. Schamotte ist eine Masse aus bereits vorgebranntem und gemahlenem Ton oder Kaolin mit ungebranntem plastischem Bindeton. Die Zusammensetzung der Tone schwankt je nach ihrer Herkunft. Sie enthalten meist etwas über 50%  $\text{SiO}_2$  und 40—45%  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Eisen- und Alkalioxyde sind in geringen Mengen fast immer vorhanden.

Für die Zwecke des Elektroofenbaues soll die Schamotte möglichst frei von Alkalioxyden sein. Die Tone müssen also entsprechend ausgewählt und ohne Feldspatzusatz verarbeitet werden. Die Schamotte soll auch keinen freien Quarz enthalten, da die oben erwähnte Cristobalit-Umwandlung den Stein zermürbt und die Gefahr einer Schlackenreaktion mit  $\text{FeO}$  besteht (vgl. S. 268). Allgemein kann man noch sagen, daß die elektrische Isolierfähigkeit um so höher ist, je höher der Tonerdegehalt und damit die Brenntemperatur der Schamotte ist. Man verwendet daher als Heizleiterträger meist Spezialschamotten, denen geschmolzene Tonerde (Korund) zugesetzt ist, oder die nur aus Korund mit Bindeton oder Kaolin aufgebaut sind. Eine Sonderstellung in dem Zweistoffsystem  $\text{SiO}_2$ — $\text{Al}_2\text{O}_3$  nimmt die als Mineral „Sillimanit“ vorkommende Verbindung  $\text{SiO}_2 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$  ein (vgl. S. 39). Sillimanit wird zu Steinen mit 63% Tonerde verarbeitet und bei etwa 1850° C gebrannt.

Dabei wandelt sich der Sillimanit zum größten Teil in die äußerst beständige kristalline Form des Mullit ( $3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$ ) um. Der zu Formsteinen, Trägern, Rohren gebrannte Sillimanitstein zeigt hervorragende Eigenschaften hinsichtlich elektrischer Isolierfähigkeit und Temperaturwechselbeständigkeit und wird immer mehr an hochbeanspruchten Stellen im Ofenbau verwendet. Sein spez. Widerstand ist bei  $1000^\circ$  noch etwa 10mal so groß wie der anderer Schamotten. Sillimanit kann mit geringer Porosität und hoher Wärmeleitfähigkeit oder umgekehrt

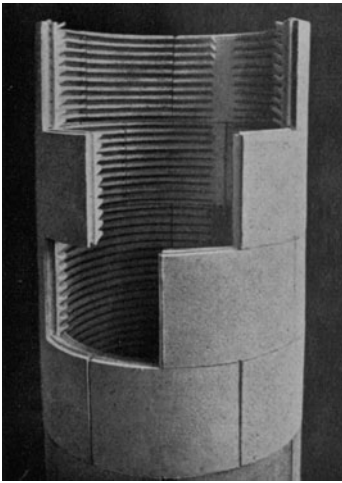


Abb. 215. Heizkörpertragsteine aus Sillimanit.

als ausgesprochener Isolierstein mit großer Porosität hergestellt werden. Er hat eine wesentlich höhere Druckfeuerbeständigkeit als andere Schamotten. Sein Erweichungspunkt liegt über  $1600^\circ$ . Abb. 215 zeigt als Beispiel für die maßgenaue Verformbarkeit Heizkörpertragsteine für einen Industrieofen.

Die grobkörnigen Schamotten mit einer Porosität von 20% aufwärts sind im Großofenbau die meistverwendeten Heizleiterträgerstoffe. Ihre Körnigkeit verhindert aber die Herstellung feinerer Formstücke für kleinere Heizgeräte. Diese können aus Grobkeramik nicht mehr sauber geformt werden und haben keine Kantendruckfestigkeit.

Darum sind verschiedene Feinschamotten entwickelt worden, die ebenfalls auf Tonbasis aufgebaut sind, aber durch veredelnde Bestandteile verbesserte Gesamteigenschaften haben. Der in der Tafel II genannte Rheosit ist als typischer Vertreter dieser Reihe herausgegriffen. Es sind meist Schamotten mit Korundzusatz, also hochtonerdehaltig, um die Temperaturbeständigkeit heraufzusetzen. Feldspat als Flußmittel wird vollkommen ausgeschaltet, da sein Gehalt an Kalium- und Natriumoxyd die elektrische Leitfähigkeit in der Wärme heraufsetzt. Auch die besonders temperaturfeste MARQUARDTSCHE Masse ist eine hochtonerdehaltige Masse von Mullitcharakter.

**3.32 MgO-haltige Massen.** Eine wesentliche Verbesserung der Massen im Sinne einer gleichwertigen Vereinigung von befriedigenden elektrischen, thermischen und mechanischen Eigenschaften ist dadurch erzielt worden, daß man durch Hinzunahme von Speckstein ( $3\text{MgO} \cdot 2\text{SiO}_2$ ) von dem Zweistoffsystem  $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2$  auf das Dreistoffsystem  $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{MgO} - \text{SiO}_2$  übergang. Die reinen Steatite (85—90% Speckstein) haben hervorragende elektrische Eigenschaften, aber eine starke Wärmeausdehnung,

so daß sie für die Zwecke der Elektrowärme in größeren Stücken nicht brauchbar sind. Die Mg-freien Schamotten haben dank ihrer Porosität genügende Temperaturwechselbeständigkeit, aber nicht die hohen elektrischen Eigenschaften. Die Wasseraufnahmefähigkeit der porösen Schamotten ist in vielen Fällen auch unerwünscht. Durch systematische Arbeiten ist es gelungen, in dem Dreistoffsystem  $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{MgO} - \text{SiO}_2$  ein Gebiet zu finden, das Massen mit einem außerordentlich geringen Ausdehnungskoeffizienten ergibt. Es sind Massen mit 25—35% Speckstein, d. h. etwa 10% MgO. Diese Massen (vgl. Sipa 14 und Ardostan in Tafel II) haben einen fast dichten Scherben mit einem Ausdehnungskoeffizienten von nur  $1,0 \dots 1,5 \cdot 10^{-6}$ . Dieser geringe Ausdehnungskoeffizient verleiht den Massen die hohe Temperaturwechselbeständigkeit, die gepaart ist mit hervorragenden elektrischen Eigenschaften, da alle alkalischen Bestandteile in dem Versatz vermieden sind. Da der Scherben nahezu dicht brennt und eine mechanische Festigkeit erreicht, die der besten Porzellan gleichkommt, haben diese Massen sowohl im Elektro-Heizgeräteebau breiteste Verwendung gefunden, wo schroffe Temperaturwechsel auftreten und Aufnahme von Feuchtigkeit ausgeschlossen sein muß, als auch im Elektroofenbau einen Platz in der ersten Reihe der Isolierbaustoffe erobert, wo neben mechanischer Festig-

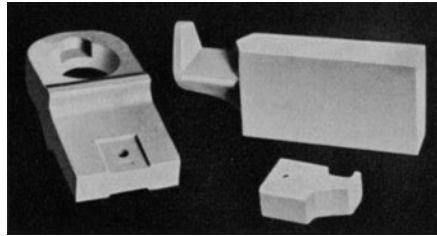


Abb. 216. Ofensteine aus Sipa 14. Ring- und Nasenform.

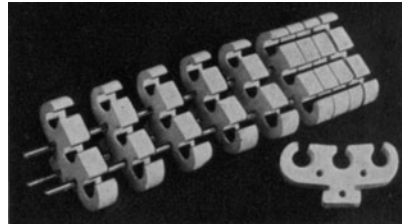


Abb. 217. Heizwendelträger. Aufbau aus gleichen Einzelteilen.

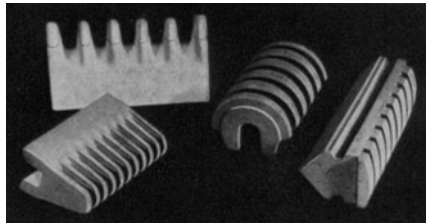


Abb. 218. Isolierkörper für Raumheizgeräte.



Abb. 219. Isolierkörper für Heizpatrone aus Einzelteilen.

keit vor allem ihre Durchschlagfestigkeit in der Hitze wertvoll ist.

Die Masse wird im Naßpreßverfahren verarbeitet, mit dem die kompliziertesten Stücke hergestellt werden können. Die Abb. 216 bis 219 geben einige Beispiele. Die verhältnismäßig geringe Schwindung ermöglicht große Maßgenauigkeit der Stücke, so daß auch größere Heizkörper aus Einzelteilen aufgebaut werden können (z. B. Heizpatrone Abb. 219).

Gegenüber diesen besonders temperaturwechselbeständigen Massen mit mäßigem Magnesiumsilikatzusatz sind die tonerdefreien Magnesiumsilikate in ihren Sonderqualitäten Frequenta und Calit hinsichtlich ihrer elektrischen Eigenschaften noch um 1 bis 2 Zehnerpotenzen überlegen (vgl. S. 139 u. 226). Sie haben aber wie die ganze Gruppe der Steatite einen ausgesprochen hohen Ausdehnungskoeffizienten und sind wenigstens in größeren Stücken empfindlich gegen schroffen Temperaturwechsel. In der Wärmetechnik können sie daher nur in kleinen Stücken

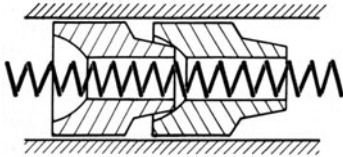


Abb. 220. Isolierperlen für Heizwendel, Schnitt.

verwendet werden, eignen sich aber dann, wenn eine besonders hohe elektrische Beanspruchung in der Hitze vorliegt. Diese hochwertigen Steatitmassen werden in Form von Isolierperlen für Heizwendel überall da bevorzugt, wo die Isolierung auf engstem Raum beschränkt werden muß. Es

kommt dazu, daß diese noch dichteren Sondersteatite eine höhere Wärmeleitfähigkeit haben, als die vorher genannten specksteinhaltigen Schamotten. Bei den bisher gezeigten Beispielen spielte die Wärmeleitfähigkeit nicht unmittelbar eine Rolle, da es durchweg Tragkörper für Strahlheizkörper waren. Bei der Isolierperle muß aber die Wärme durch die Perle hindurch übertragen werden, so daß die hohe Wärmeleitfähigkeit neben der Form der Perle entscheidend für eine gute Wärmeübertragung vom Heizleiter an die Wärmeplatte ist. In Abb. 220 ist der Schnitt durch eine Isolierperle dargestellt; sie ist so geformt, daß sie

1. bei Biegungen den Stromleiter noch allseitig umschließt,
2. zwischen Stromleiter und Gehäuse den verlangten Kriechweg von mindestens 3 mm einhält,
3. der Wärmeleitung eine möglichst große Fläche bietet.

Abb. 221 zeigt den Schnitt durch eine Kochplatte mit Perlenisolierung. Die Herdplatte selbst ist eine Gußplatte mit unten eingegossenen Rillen, die genau der Perlenform angepaßt sind. In diese Rillen wird die Perlenschnur eingelegt, so daß die Perlen auf der Hälfte ihrer Oberfläche Berührung haben. Auf diese Weise wird eine große Oberfläche für die Wärmeübertragung geschaffen. Die Unterseite wird dann mit einer keramischen Platte aus einer Kaolin-Leichtschamotte abgedeckt, die

infolge ihrer hohen Porosität nur ein Raumgewicht von etwa  $1,2\text{g/cm}^3$  hat und eine gute Wärmeisolierung nach unten ergibt.

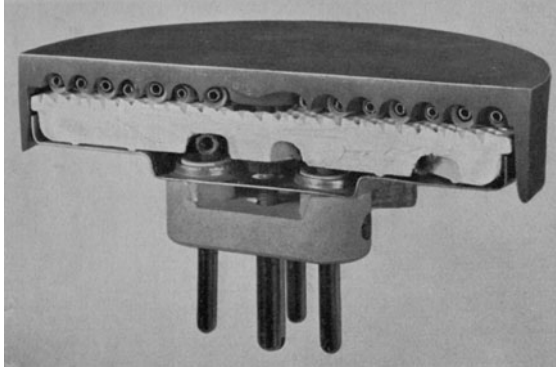


Abb. 221. Wärmeleitungskochplatte mit Perlenisolation.

Ein anderes Beispiel für die Verwendung der Perlenisolierung des Heizleiters zeigt Abb. 222: die Heizung eines Bratrohres. Das Bratrohr selbst besteht hier aus einem innen emaillierten Eisenblechgehäuse mit glatten Wänden. Auf Decke und Boden wird von außen dieses Deckblech aufgelegt, in dessen eingedrückten Nuten der Perlenheizkörper liegt. Die Berührung mit dem eigentlichen wärmeübertragenden Bratrohrmantel ist hierbei jedoch nicht so günstig wie bei der Kochplatte mit eingegossenen Rillen, da die runden Perlen mit der glatten Wand nur geringe Berührungsflächen haben.

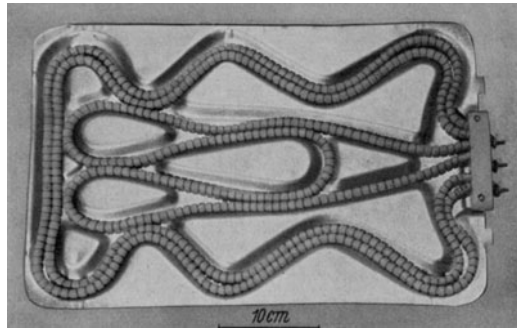


Abb. 222. Heizungsteil eines Bratrofens mit perlensoliertem Heizwendel.

### 3.4 Einbettmassen.

Bei der bisher besprochenen Ausführung von Heizkörpern und Heizgeräten war der metallische Heizwiderstand von vorgeformten und keramisch vorher gebrannten Körpern getragen. Die Wärme wird hierbei meist unmittelbar durch Strahlung von dem Heizwiderstand auf den zu erwärmenden Körper oder Raum übertragen. Die Heizwiderstände

müssen daher möglichst offen liegen, um frei abstrahlen zu können. Die Gefahr der Beschädigung des Heizleiters sowie der unbeabsichtigten Berührung ist beseitigt, wenn der Heizdraht in eine elektrisch isolierende keramische Masse fest eingebettet ist. Dies führt auf die Form der Glühmuffeln mit eingebetteten Heizleitern, wie sie z. B. aus der Abb. 223 zu ersehen sind. Diese Muffelbauart hat wärmetechnisch den Vorteil, daß die mechanisch tragende Ofenwand außerordentlich dünn gehalten werden kann, so daß die Speicherwärme des Ofens gering wird. Bei allen unterbrochen betriebenen Öfen ist eine geringe Speicherwärme für die Energiebilanz wichtig. Um die geschlossene Muffel wird leichte



Abb. 223. Ofenmuffeln mit eingebetteten Heizdrähten.

Isoliermasse (Kieselgur) aufgeschüttet; eine schwere Ofenmauer ist dadurch vermieden. Derartige Muffeln werden bis zu einem Durchmesser von 1,20 m gebaut. Die Wandstärke der Muffel selbst beträgt nur 30—40 mm. Für den Aufbau der Muffeln handelt es sich auch hier um Massen

aus hochfeuerfesten Oxyden, wie sie für die keramischen Erzeugnisse verwendet werden. Der Unterschied der Behandlung liegt vor allem darin, daß die Verfestigung bei einer Temperatur geschehen muß, die der Heizleiter vertragen kann. Die Einbettmassen werden daher bei weitem nicht so hoch gebrannt, wie hart gebrannte keramische Stücke. Der Auftrag von keramischer Masse zwischen Heizdraht und Muffelinnenfläche beträgt nur wenige Millimeter. Da die Wärme vom Heizleiter durch diese keramische Schicht hindurch nach dem Muffelinneren gehen muß, ist die Masse auf einem kristallinen Grundstoff mit möglichst guter Wärmeleitfähigkeit aufgebaut.

Für derartige Glühmuffeln wird meist ein Gemisch von Korund und möglichst alkalifreiem Ton verwendet. Die Masse läßt sich mit etwas Wasser angefeuchtet plastisch verarbeiten. Auf einer Schablone nach der gewünschten Form des Muffelkörpers wird das Heizwendel aufgelegt und nun in Masse eingebettet. Nach einiger Zeit kann die Schablone entfernt werden. Die luftgetrocknete Muffel wird dann bei 900—1000° im Ofen gebrannt und erhält dabei eine solche Festigkeit, daß sie als Tragkörper für die auf der Muffel ruhende Wärmeisolierung des Ofens dienen kann. Daß die Muffel dann im Gebrauch von dem eingebetteten



Heizdraht her noch wesentlich höher erhitzt wird, schadet ihr nicht, sondern erhöht noch die Festigkeit. Voraussetzung ist allerdings, daß der Erweichungspunkt der Masse wesentlich über der Gebrauchs-

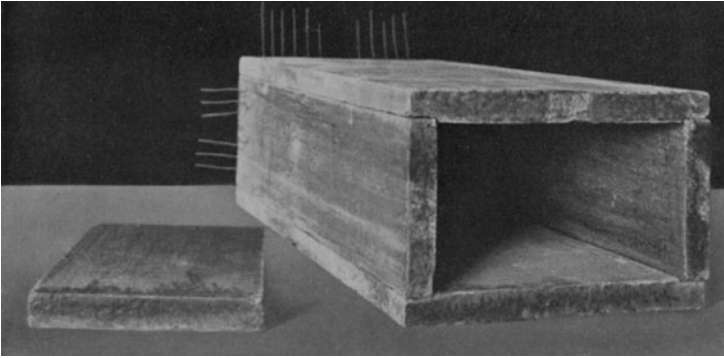


Abb. 224. Muffel aus Calodur-Platten mit eingebraunten Heizdrähten.

temperatur der Muffel liegt. Statt der geschlossenen Muffeln werden auch Muffelplatten zum Zusammenbau von Ofenwänden auf dieselbe Weise hergestellt (Abb. 224).

Eine andere Art der Muffelherstellung ist in Abb. 204 bereits gezeigt worden. Hier ist eine vorgebrannte Schamottemuffel verwendet, auf welche die Heizwicklung aufgelegt und dann in Masse eingebettet wird, um sie in ihrer Lage festzuhalten und nach außen mechanisch und elektrisch zu schützen. Ähnlich ist die Einbettung der Platinheizwicklung bei kleinen, elektrisch beheizten Tiegelöfen (Abb. 225). Für solche Zwecke hat sich die MARQUARDTSCHE Masse, eine Masse mit über 80% Tonerde, am besten bewährt. Sie hat die nötige Beständigkeit für die hohen Temperaturen, die am Platindraht auftreten, und ist genügend alkalifrei, um Elektrolyse zu vermeiden, die besonders bei Gleichstrom eine Gefahr für die Stellen höchsten Potentials, d. h. die Einführungsstellen bedeutet (s. auf Abb. 225 die zur größeren Deutlichkeit künstlich nachgefärbte Stelle an der oberen Zuleitung).



Abb. 225. Tiegelofen mit Platinheizung. (Höhe 75 mm.)

Von etwas anderen Gesichtspunkten ist die Entwicklung der Masse-

kochplatte ausgegangen. Bei der Kochplatte mit Perlenisolierung (S. 272) war bereits auf die Wichtigkeit eines guten Wärmeüberganges vom Heizdraht zur Platte hingewiesen. Wenn auch bei der Formgebung von Isolierperle und Platte eine möglichst gute Wärmeübertragung durch unmittelbare Berührung angestrebt war, so ist doch die Berührung zwischen Heizdraht und Isolierkörper auf verhältnismäßig kleine Teile der Drahtoberfläche beschränkt, so daß hier der Hauptteil der Wärmeenergie noch durch Strahlung an den Isolierkörper übergehen muß. Ist der Heizdraht dagegen in die isolierende Masse fest eingebettet, so ist für die Wärme ein unmittelbarer Leitungsweg vom Heizdraht zur Heizplatte oder zum Gehäuse gegeben.

Ein Unterschied zu den vorher besprochenen Glühmuffeln besteht insofern, als die Einbettmasse bei Kochplatten nicht die hohe mechanische Festigkeit aufweisen muß wie bei frei tragenden Muffelkörpern. Da sie andererseits auch nicht bei hohen Temperaturen gebrannt werden kann, wird die Verfestigung im wesentlichen durch hohen Druck erzielt. Dagegen ist die elektrische Beanspruchung der Einbettmasse bei Kochplatten wesentlich höher als bei Muffeln. Bei diesen ist nur der verhältnismäßig kleine Spannungsschritt von einer Heizleiterwindung zur nächsten zu isolieren, während bei der Kochplatte die ganze Spannung zwischen Heizleiter und geerdeter Platte an der Isolierschicht zwischen beiden liegt. Da der Wärmeübergang von Wendel zur Platte möglichst unbehindert sein soll, kommt es hier darauf an, mit geringster Schichtdicke der Isolation die verhältnismäßig hohe Spannungsbeanspruchung in der Wärme zu bewältigen. Diesen Anforderungen hoher elektrischer Festigkeit in der Wärme und gleichzeitig hoher Wärmeleitfähigkeit ist nach den bisherigen Erfahrungen am besten Magnesiumoxyd gewachsen.

Die meisten Einbettmassen für Kochplatten bestehen aus reiner Magnesia mit geringen Zusätzen aus Ton, Kaolin oder Speckstein zur Bindung. Die ebenfalls mit Ringen versehene Gußplatte (Abb. 226 a) wird zunächst mit der fast trockenen krümeligen Masse bis zu einem bestimmten Maß gefüllt (Abb. 226 b). In die noch lockere Masse wird mit Hilfe einer Schablone das nackte Wendel eingedrückt, so daß es gerade in die Rinnen zu liegen kommt (Abb. 226 c). Dann wird weitere Masse daraufgeschüttet und das Ganze unter einem Druck von 100—200 at gepreßt (Abb. 226 d). Durch diesen hohen Druck ist die Masse genügend verfestigt. Die Dichtigkeit ist so groß, daß die Wärmeleitfähigkeit annähernd der von dicht gebrannten keramischen Körpern entspricht. Es folgt nunmehr eine Trocknung von wenigen hundert Grad, um die Feuchtigkeit auszutreiben. Die Schichtdicke zwischen Wendel und Platte beträgt nicht mehr als 1,5—2,5 mm. Sie genügt zur Isolation.

Bei der in Abb. 227 dargestellten Ausführungsform ist nicht ein rund gewickeltes Wendel, sondern ein in ebenen Wellen gebogener Heizdraht



Abb. 226 a. Gußplatte.



Abb. 226 b. Gußteil, gefüllt mit Isoliermasse.

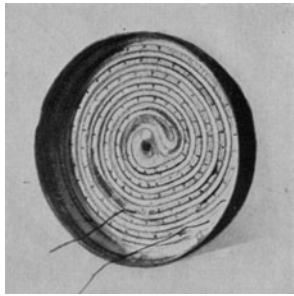


Abb. 226 c. Heizwendel eingedrückt.

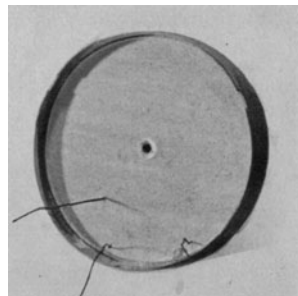


Abb. 226 d. Fertig gefüllt und gepreßt.

Abb. 226 a—d. Werdegang einer Massekochplatte.

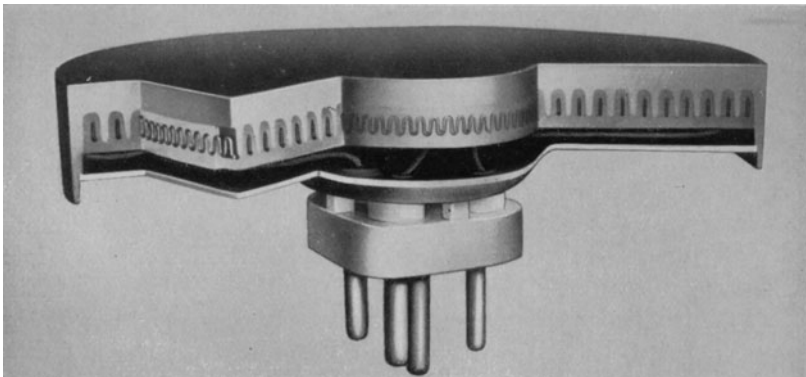


Abb. 227. Kochplatte mit wellenförmig gebogenem Heizdraht.

verwendet. Dies stellt eine Fortentwicklung in dem Bestreben nach bester Wärmeübertragung vom Heizleiter auf die Platte dar.

Als Nachteil der Masseplatte ist die Empfindlichkeit gegen Feuchtigkeitsaufnahme zu nennen. Im ganzen halten sich beide Ausführungsformen, die mit Perlenisolierung und die mit Masseisolierung, die Waage. In Deutschland wird zur Zeit bei etwa 80 % aller Kochplatten die Masseisolierung angewandt, in Skandinavien hat dagegen die Perlenisolierung das Übergewicht.

### 3.5 Rohrheizkörper.

Eine weitere Beschränkung des Dielektrikums auf engsten Raum stellt der Rohrheizkörper dar. Der Gedanke war, einen mechanisch unempfindlichen elektrisch geschützten Heizkörper zu bekommen, der sich in seiner Form den verschiedenen Bedürfnissen anpassen läßt. Diesem Wunsch entspricht ein Heizwendel, das in einem Metallrohr konzentrisch und isoliert gelagert ist, und zwar so, daß das Rohr sich nachträglich beliebig zu Tauchheizkörpern, Heizschlangen u. dgl. biegen läßt.

Die einfachste Ausführung dieses Gedankens wäre das perlenisolierte Wendel in einem Metallrohr. Die Wärmeübertragung auf das Metallrohr ist aber nur dann gut, wenn eine enge Berührung zwischen Rohr und Perle gewährleistet ist. Wird ein solches Rohr scharf gebogen, so besteht die Gefahr, daß die spröden Steatitperlen zerbrechen, und daß die scharfkantigen und harten Splitter Draht und Mantel beschädigen.

Einen Fortschritt bedeutet folgende Ausführungsform: Das Wendel wird durch ein gerades dünnwandiges Isolierrohr von dem Metallrohr getrennt und ist innen mit losem Sand ausgefüllt. Das Isolierrohr ist nicht hart gebrannt, sondern nur geschrüht, d. h. auf 600—800° gebrannt. Bei dieser Temperatur wird das Kristallwasser ausgetrieben, es tritt eine verhältnismäßig lockere Bindung der Masse, aber noch keine Sinterung ein. Die elektrische Isolierung ist trotzdem ausreichend. Wird jetzt der Rohrheizkörper gebogen, so zerbricht das Isolierrohr. Da es aber nicht hart gebrannt ist, zerkrümelt es ohne irgendeine Stelle beschädigen zu können. Da der ganze Raum gleichmäßig ausgefüllt ist, bleibt die konzentrische Lage des Wendels gewahrt.

Noch einen Schritt weiter geht der amerikanische Calrodstab, der in Deutschland als Istrastab von der AEG hergestellt wird. In einem Metallrohr wird das Wendel ausgespannt. Reines MgO von bestimmter feiner Körnung wird von oben trocken eingefüllt. Durch eine Klopfeinrichtung wird dafür gesorgt, daß die Füllung dicht liegt. Eine Führung, die mit der fortschreitenden Füllung nach oben läuft, gewährleistet, daß das Wendel seine konzentrische Lage behält. Auf diese Weise wird der Stab gefüllt, die Füllung ist aber so locker, daß sie hoher Beanspruchung nicht standhalten würde und keine ausreichende

Wärmeleitung gibt. Bei Biegung des Rohres würde sich das Wendel verlagern. Das gefüllte Rohr wird nun in einer konzentrischen Hämmermaschine einer Querschnittverringerung unterworfen. Durch diese Quersstauchung wird die Magnesiafüllung so verdichtet, daß das Wendel auch bei Biegungen des Rohres nicht mehr ausweichen kann. Abb. 228 gibt die Masseverdichtung an, die mit dieser Verjüngung des Stabdurchmessers erreicht werden kann. Über eine Verjüngung von 20% geht man praktisch nicht hinaus. Die Isolierschicht, die das Wendel konzentrisch umgibt, bekommt dadurch eine wesentlich höhere Durchschlagfestigkeit in kaltem Zustand und hat auch bei höheren Temperaturen einen Isolationswiderstand, wie er Sintermagnesia entspricht. Gleichzeitig ist die Wärmeleitfähigkeit der Isolierschicht erheblich gestiegen, so daß mit Übertemperaturen am Wendel gegenüber dem Schutzrohr von nur  $100^{\circ}$ — $150^{\circ}$  gearbeitet werden kann.

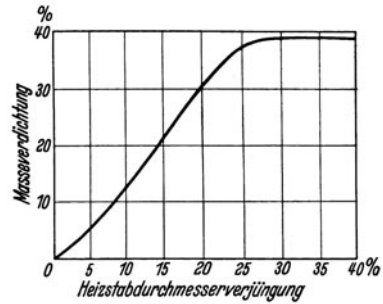


Abb. 228. Masseverdichtung eines Istrastabes in Abhängigkeit von der Stabdurchmesser-Verjüngung.

Der Gedanke des Rohrheizkörpers beschäftigt die Technik schon lange. Er mußte aber erst eine vieljährige Entwicklung durchlaufen, ehe der Rohrheizkörper zu einer betriebsicheren Form durchgebildet war. In England und Amerika ist er bereits mehr in Gebrauch als in Deutschland. Ein englisches Werk stellt z.Zt. im Tag ca. 500 m Rohr-

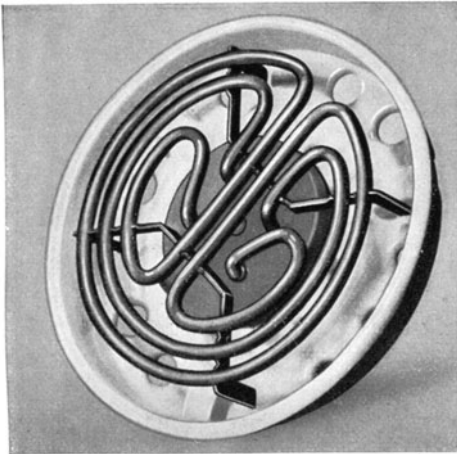


Abb. 229. Strahlungskochplatte mit freiliegendem Heizrohr.

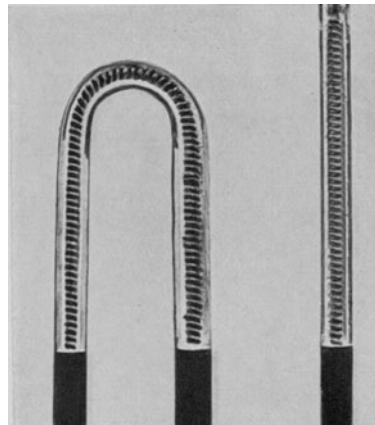


Abb. 230. Schnitt durch ein gerades und ein gebogenes Backerrohr.

heizkörper her. Der Werkstoff des Außenrohres wird im wesentlichen nach dem Verwendungszweck gewählt. Für die Warmwasserbereitung und viele Fälle sonstiger Flüssigkeitserhitzung wird Kupfer verwendet; für höhere Temperaturen kommen Nickel, Chromstähle und Chromnickel zur Verwendung. Die Rohre können beliebig gebogen werden und werden zu Strahlungskochplatten (Abb. 229), Tauchsiedern, Heizschlangen für Bäder und Trockenschränke verarbeitet.

Einen ganz anderen Weg zu demselben Ziel eines Rohrheizkörpers mit dicht gepreßter Magnesiumoxyd-Isolierung geht das von dem Schweden BACKER angegebene Verfahren. Magnesiummetall wird von Wasser bei etwa  $240^{\circ}\text{C}$  unter entsprechendem Druck unter Abspaltung von Wasserstoff zu Magnesiumhydroxyd verwandelt. Diese Reaktion wird ausgenützt, um zwischen Heizwendel und metallischem Schutzrohr die isolierende dichte MgO-Schicht zu bilden. Zwischen Rohr und Wendel werden Blechstreifen aus reinem Magnesiummetall eingelegt. Das Wendel ist dadurch auf jeden Fall konzentrisch gelagert. Das Rohr wird dann im Autoklaven unter Wasser bei einem Druck von ca. 40 at auf  $240^{\circ}$  erhitzt. Dabei geht das Magnesiummetall unter starker Volumenvergrößerung in das Hydroxyd über. Die Volumenvergrößerung bei der Umwandlung bewirkt eine dichte Pressung der Zwischenschicht, so daß eine nachträgliche mechanische Querschnittverminderung wie bei dem Istrastab nicht mehr nötig ist (Abb. 230). Das in dem Hydroxyd enthaltene Kristallwasser wird durch eine nachfolgende Erhitzung



Abb. 231. Querschnitt eines Backerrohres. (2  $\times$  vergrößert.)

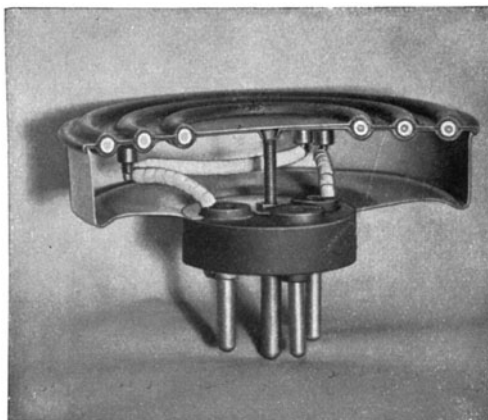


Abb. 232. Geschlossene Strahlungskochplatte mit Backerrohr. (Schnitt.)

auf ca.  $600^{\circ}$  entfernt, so daß die Isolierschicht aus reinstem Magnesiumoxyd besteht. Die Isolierschicht besteht aus fest ineinander verwachsenen Periklaskristallen (Abb. 231). Die elektrischen und wärmetechnischen Eigenschaften der Stäbe sind bei beiden Herstellungsverfahren praktisch

gleich. In Abb. 232 ist noch als Gegenstück zu der Ausführungsform der Abb. 229 eine andere Art der Verwendung des Rohrheizkörpers zu einer Glühkochplatte gezeigt. Hier ist der ringförmig gebogene Rohrheizkörper zwischen zwei hitzebeständige Bleche eingelegt, um eine geschlossene Heizplattenfläche zu erhalten.

Eine besondere Verwendungsform der Rohrheizkörper ist das unmittelbar eingegossene Backerrohr. Sowohl in Eisen als auch in Aluminium oder andere Metalle läßt sich der fertig gebogene Rohrheizkörper eingießen. Das umgossene Metall verbindet sich fest mit dem Außenrohr des Heizkörpers. Bei

Eisen löst sich dieses z.T. in dem Guß. Die Magnesiumschicht wird aber von dem Guß nicht angegriffen. Auf diese Weise ist eine vorzügliche Wärmeübertragung auf die Gußplatte geschaffen. Abb. 233 zeigt den Schnitt durch eine Kochplatte, die in dieser Weise aufgebaut ist. Bei dem Leichtbügeleisen (Abb. 234) ist der Backerheizkörper großer Leistung unmittelbar in die Sohlenplatte aus Aluminium eingegossen, so daß nur die Anschlußenden zugänglich sind. Neben der guten Wärmeübertragung ist durch diese Bauart auch der beste Schutz gegen mechanische Beschädigung gegeben.

### 3.6 Glimmer und Asbest.

Nun noch einige Worte über die beiden einzigen Mineralien, die in ihrem natürlichen Zu-

stand in der Elektrowärme als Isolatoren verwendet werden, Glimmer und Asbest; beides Stoffe, die durch künstliche Stoffe noch nicht gleichwertig ersetzt werden können. Ihre Wichtigkeit für die Elektrowärmetechnik liegt nicht so sehr in den elektrischen Eigenschaften, wenn diese auch bei Glimmer ganz hervorragend sind. Entscheidend für ihre Wahl gegenüber anderen Isolierstoffen sind die mechanischen Eigenschaften. Glimmer ist zu ganz dünnen Platten spaltbar und überall da unentbehrlich, wo auf sehr flachem Raum elektrische

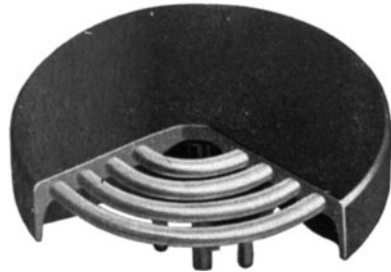


Abb. 233. Wärmeleitungskochplatte mit eingegossenem Backerrohr.

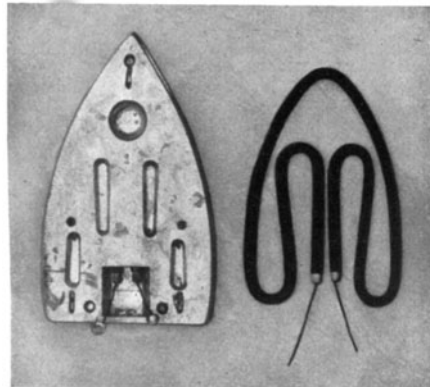


Abb. 234. Aluminiumsohle eines Bügeleisens mit eingegossenem Backerrohr.

Heizung untergebracht werden muß. Asbest mit seiner feinen Faserstruktur ist der einzige Stoff, der für höhere Temperaturen eine biegsame Isolierung ermöglicht.

Glimmer kommt in der Natur in verschiedenen Arten vor, die eine stark voneinander abweichende chemische Zusammensetzung haben. Für die technische Verwendung sind davon zwei Arten wichtig, der Muskowitglimmer, ein Kalium-Aluminium-Hydro-Silikat von der Zusammensetzung  $K_2O \cdot 3Al_2O_3 \cdot 6SiO_2 \cdot 2H_2O$ , und der Phlogopit- oder Amberglimmer mit der Zusammensetzung  $K_2O \cdot 3Al_2O_3 \cdot 12MgO \cdot 12SiO_2 \cdot 2H_2O$ . Wegen des hohen Anteils an Magnesiumoxyd wird der Phlogopit auch als Magnesiaglimmer im Gegensatz zu ersterem als Kaliglimmer bezeichnet. Glimmer ist an vielen Stellen der Erde zu finden. Das Schwerkocher liegt in USA., Britisch-Indien, Kanada und Afrika. Muskowitglimmer wird nach Deutschland meist aus Indien, Amberglimmer aus Madagaskar eingeführt. Der Preis des Glimmers richtet sich nach seiner Reinheit und nach der Größe der Blätter. Muskowitglimmer ist an sich glasklar, Phlogopit bernsteingelb bis dunkelbraun. Eisenoxyd und andere Einschlüsse färben den Glimmer häufig fleckig und stellenweise dunkel. Sofern die Einschlüsse nicht kristallin sind, beeinträchtigen sie die Durchschlagfestigkeit des Glimmers nicht wesentlich. Die Größe der Tafeln kommt bis an 500 cm<sup>2</sup>. Im Mittel liegt die Plattengröße bei 30—50 cm<sup>2</sup>; für größere Tafeln steigen die Preise bald weit über die Mittelwerte. Amberglimmer ist teurer als Muskowit.

Glimmer kristallisiert monoklin in dünnen Tafeln, die sich in ganz gleichmäßig dünne Blätter aufspalten lassen. Bei klarem Muskowitglimmer kann man Blätter bis zu 0,006 mm Dicke abtrennen. Die einzelnen Blätter haben eine erstaunliche Biegsamkeit. Ein Blatt von 0,2 mm Stärke ist bei gutem Glimmer ohne Ribbildung über einen Dorn von 50 mm Durchmesser zu biegen. Gleichzeitig haben die einzelnen Blätter eine hohe ZerreiBfestigkeit, die mit 25—30 kg/mm<sup>2</sup> in der Größe derjenigen von GuBisen liegt. Diese Biegsamkeit und mechanische Festigkeit ermöglichen eine Reihe von Heizkörperausführungen, die mit anderen Isolierstoffen unmöglich sind (Abb. 235).

Der natürliche Kristall ist temperaturbeständig bis zum Kalzinierungspunkt, der bei Muskowit zwischen 600° und 800°, bei Amberglimmer zwischen 900° und 1100° liegt. Bei diesen Temperaturen, bei denen das Kristallwasser frei wird, trübt sich die klare Farbe des Blattes, der Glimmer wird brüchig und verliert seine Festigkeit.

Die elektrischen Eigenschaften sind nur bei Raumtemperatur genauer untersucht. Der spez. Widerstand bei Raumtemperatur wird mit 10<sup>13</sup> bis 10<sup>15</sup> Ohm·cm angegeben, die Durchschlagfestigkeit mit 50 bis 100 kV/mm. Einige Angaben lassen darauf schließen, daß der Über-



gang vom elektrischen zum Wärmedurchschlag bei verhältnismäßig hohen Temperaturen liegt, so daß bis zu einigen hundert Grad mit dieser hohen elektrischen Festigkeit gerechnet werden kann. Im Gerätebau kann der Glimmer daher in sehr geringer Stärke als Isolierung verwendet werden.

Des billigeren Preises wegen wird in der Hauptsache Muskowitglimmer in der Elektrowärmetechnik verwendet. Über  $600^{\circ}\text{C}$  ist allerdings Phlogopit vorzuziehen, da Muskowit bei dieser Temperatur bereits seine Festigkeit und damit auch seine guten elektrischen Eigenschaften verliert. Phlogopit ist bis  $900^{\circ}$ — $1000^{\circ}$  zu verwenden.

Da die natürlichen Tafeln mittlerer Größe für viele Verwendungszwecke nicht ausreichen und größere Tafeln zu teuer oder gar nicht zu haben sind, wird in solchen Fällen das künstliche Mikanit verwendet, das aus vielen Lagen dünnsten Glimmers zusammengesetzt ist, die mit Schellack zu einer festen Tafel verklebt sind. Der Lackanteil soll bei Heizmikanit nicht über 1,5% betragen. Die flüchtigen Bestandteile brennen bei der ersten Benützung des damit gebauten Heizkörpers vollkommen heraus. In der Durchschlagfestigkeit steht Mikanit dem Reinglimmer kaum nach. Wegen der geringeren mechanischen Festigkeit wird Mikanit kaum unter 0,3 mm Stärke benutzt.

Glimmer ist ein sehr schlechter Wärmeleiter. Auch die Strahlendurchlässigkeit für die langwelligen Wärmestrahlen ist gering. Aus diesem Grunde müssen die Deckschichten aus Glimmer so dünn sein, als es die elektrische Festigkeit zuläßt. Bei Naturglimmer geht man für eine Spannung von 220 V bis auf eine Stärke von 0,12 mm herunter.

Das andere Mineral, das zu Isolierzwecken verwendet wird, ist Asbest, ein Magnesiumsilikat, das in eigentümlich faseriger Struktur vorliegt. Durch eine besondere Aufbereitung werden die Kristalle zu weichen watteartigen Flocken und Fasern aufgeschlossen. Wegen seiner hohen Feuchtigkeitsaufnahme ist Asbest an sich ungeeignet für elektrische Isolierung. Er ist aber der einzige Stoff mit hoher Temperaturbeständigkeit, der zu einer weichen biegsamen Isolation verarbeitet werden kann. Da noch kein anderer genügend temperaturbeständiger biegsamer Isolierstoff gefunden ist, wird Asbest für die Umspinnung der Heizdrähte in Heizkissen verwendet. Für die Temperatur, auf die in einem Heizkissen der Heizleiter im gewöhnlichen Gebrauch kommen

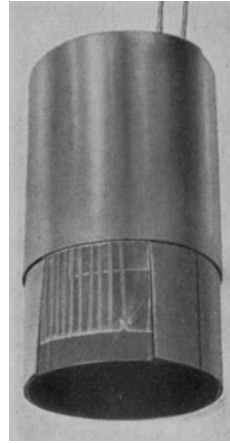


Abb. 235. Hülse eines Ringtauchsieders mit Glimmerheizkörper.

darf, würde an sich auch Baumwolle oder Seide ausreichen. Asbest als Umhüllung hat aber noch eine andere Aufgabe. Asbest ist ein sehr schlechter Wärmeleiter und außerdem nicht brennbar. Wenn in einem Heizkissen unter Strom ein Bruch des Heizleiters eintritt, so wird der sich bildende kleine Lichtbogen nicht zum Brand führen, weil die Asbesthülle des Leiters die Wärme nicht bis zu dem brennbaren Stoffüberzug fortleitet. Der Lichtbogen verlöscht ohne weiteren Schaden anzurichten.

In allen anderen Fällen ist Asbest nur als Wärmeschutz, nicht aber für elektrische Isolierung zu verwenden.

#### 4. Der Ableitstrom.

Es war gezeigt worden, daß allen Isolierstoffen, die für die Elektrowärme in Betracht kommen, die eine Eigenschaft gemein ist, daß ihr elektrischer Widerstand nach dem Exponentialgesetz von RASCH und HINRICHSEN mit steigender Temperatur fällt. Fast alle Heizgeräte, seien es große Industrieöfen oder kleine Kochgeräte, sind in metallische Gehäuse eingebaut. Die Metallgehäuse sind entweder absichtlich geerdet oder mit der Erde in mehr oder weniger guter leitender Verbindung. Da die meisten Netze im Sternpunkt geerdet sind, treten Ableitströme zwischen Heizleiter und Gehäuse auf, deren Größe von der Güte der Isolierung abhängt. Was die Isolierung in der Elektrowärme von der Isolierung in anderen Gebieten der Elektrotechnik grundsätzlich unterscheidet, ist die Tatsache, daß hier mit Ableitströmen von ganz anderer Größenordnung als anderswo gerechnet werden muß. Wie die elektrische Leitfähigkeit der Isolierung, so wächst auch der Ableitstrom mit der Temperatur. Die VDE-Vorschriften für Elektrowärmegeräte (VDE 0720) enthalten Angaben über die zugelassene Größe des Ableitstromes. Der neue Vorschlag für Heizgeräte sieht als Grenze 1 mA je Kilowatt Heizleistung vor. Wenn man dabei die gewöhnliche Anschlußspannung von 220—250 V gegen Erde zugrunde legt, so bedeutet diese Ableitung eine Verlustleistung von 0,25 W auf 1000 W Heizleistung. Man darf sich aber keiner Täuschung hingeben und annehmen, daß damit ein eindeutiger Gütemaßstab geschaffen sei. Im Gegenteil, die Ergebnisse der Ableitstrommessung können zu ganz falschen Schlüssen über die Ausführung der Isolierung führen, da der Ableitstrom von der Spannung und vor allem von der Heizleitertemperatur abhängt, zwei Größen, welche die Isolierung nicht betreffen. An größeren industriellen Öfen sind die Ableitverhältnisse noch wenig untersucht. Immerhin kann aus einigen orientierenden Messungen bereits entnommen werden, daß die Größe der Ableitströme je nach der Ofenausführung zwar außerordentlich verschieden ist, in jedem Fall aber mit der Temperatur sehr rasch ansteigt. Es ist nicht

ausgeschlossen, daß die Ableitströme bei dem Übergang vom Heizleiter auf den Isolator schädliche Rückwirkungen auf das Heizleitermaterial auslösen. Auch die durch die Ableitung verursachten Verluste sind bei großen Leistungen nicht ganz außer acht zu lassen. Vor allem können aber größere Stromdichten der Ableitströme zur Berührungsfahr werden. Da mit der Leitfähigkeit der keramischen Baustoffe in der Wärme gerechnet werden muß, bleibt die Folgerung für den Bau von Elektroheizgeräten und Öfen, daß die Anschlußspannung nicht zu hoch gewählt werden darf. Bei industriellen Öfen geht man gewöhnlich nicht über 380 V zwischen den Phasen, oder 250 V gegen Erde, ausnahmsweise auf 500 V zwischen den Phasen oder 320 V gegen Erde. In dem Gebiete der Ableitung sind noch zahlreiche Fragen zu klären, so daß hier der Elektrowärmeforschung noch ein weites Arbeitsfeld offensteht.

Zahlentafel 16.  
Schmelzpunkte reiner Oxyde.

	Schmelzpunkt ° C	Beginn der Erweichung ° C	Verwendbar bis ° C
Thoriumdioxid $\text{ThO}_2$ .	3000	1900	2700
Magnesiumoxyd $\text{MgO}$ .	2800	2000	2400
Zirkondioxid $\text{ZrO}_2$ . .	2700	—	2500
Berylliumoxyd $\text{BeO}$ . .	2500	2150	2200
Chromoxyd $\text{CrO}$ . . .	2300	—	—
Aluminiumoxyd $\text{Al}_2\text{O}_3$ . (Tonerde)	2050	1730	1950
Siliziumdioxid $\text{SiO}_2$ (Kieselsäure) . . .	1720	1500	entglast über 1120°
Eisenoxyd $\text{FeO}$ . . . .	1540	—	—

## Zahlentafel 17.

Thermischer Ausdehnungskoeffizient  $\alpha$  keramischer Massen  
(gemessen zwischen 0° und 100° bzw. 20° und 650°).

	$\alpha \cdot 10^{-6}$	Er- weichungs- beginn bei °C	Gefüge
<b>1. Reine Oxyde:</b>			
Magnesiumoxyd . . . . .	13	2000	dicht
Sinterkorund . . . . .	7,5	1730	dicht
Quarzglas . . . . .	0,5	1500	dicht
<b>2. Keramische Massen mit MgO:</b>			
Speckstein (3 MgO · 4 SiO <sub>2</sub> ) 33% MgO	9...10	1500	fast dicht
Steatit ca. 28% MgO. . . . .	7...9	1440	dicht
Frequenta ca. 28% MgO . . . . .	8	1440	dicht
Calit . . . . .	7,8	1440	dicht
Sipa 14 ca. 10% MgO . . . . .	1,2...1,7	1430	fast dicht
Ardestan ca. 10% MgO. . . . .	1,0...1,4	1300	dicht
<b>3. Keramische Massen ohne MgO:</b>			
Marquardsche Masse . . . . .	5,2	—	feinporös
Rheosit . . . . .	4	1650	feinporös
Sillimanit . . . . .	3,5...4,5	1620	porös
Hartporzellan . . . . .	3,5...4,5	1550	dicht
Schamotte grobporös . . . . .	3...5	1430	grobporös
Schamotte feinporös . . . . .	2,0...2,5	1430	feinporös

### Schrifttum.

Das Schrifttum zu den physikalisch-chemischen Grundlagen der keramischen Isolierstoffe ist am Ende des Vortrages I „Zur Physik der anorganischen Isolierstoffe“ angegeben. An besonderem Schrifttum über elektrische Isolierstoffe für die Elektrowärmetechnik sei folgendes genannt:

Reine Oxyde, allgemein:

WHITE, H. E.: J. Amer. ceram. Soc. Bd. 15 (1932) S. 589 (dasselbst weiteres Schrifttum).

WINZER, R.: Z. angew. Chem. Bd. 45 (1932) S. 429/31.

RYSCHKEWITSCH, E.: Elektrowärme Bd. 4 (1934) S. 30/31.

Aluminiumoxyd, Sinterkorund:

KOHL, H.: Ber. dtsh. keram. Ges. Bd. 13 (1932) S. 70/86.

— Sinterkorund als Werkstoff. ATM Z 944—4.

GERDIEN, H.: Z. techn. Physik Bd. 13 (1932) S. 586/90.

Zirkondioxyd:

RUFF, O. u. F. EBERT: Z. anorg. allgem. Ch. Bd. 180 (1929) S. 19/40.

RYSCHKEWITSCH, E.: Ber. dtsh. keram. Ges. Bd. 11 (1930) S. 619/21.

PODZUS, E.: Z. Elektrochem. Bd. 39 (1933) S. 75.

## Quarz:

- SINGER, F.: Geschmolzener Quarz, aus M. PIRANI: Elektrothermie, S. 130/161. Berlin: Julius Springer 1930.
- SKAUPY, F.: ETZ Bd. 51 (1930) S. 1745/47 u. 1768/72.
- BEAULIEU-MARCONNAY, A. VON u. TH. FRANTZ: Chem. Fabrik Bd. 9 (1936) S. 299.
- BEAULIEU-MARCONNAY, A. VON: Chem. Fabrik Bd. 9 (1936) S. 541.

## Besondere keramische Massen für Elektrowärme:

- ESSER, SALMANG u. SCHMIDT-ERNSTHAUSEN: Zur Kenntnis der Wärmeübertragung durch feuerfeste Baustoffe. Coburg: Verl. des Sprechsaal 1930.
- ALBERS-SCHÖNBERG, E.: Elektrowärme Bd. 4 (1934) S. 25/29.
- KRAUSE, O. u. E. JÄCKEL: Ber. dtsh. keram. Ges. Bd. 15 (1934) S. 485/500.
- HANDREK, H.: Keramische Spezialmassen, ATM Z 944—3 (1935) (weiteres Schrifttum).
- Calit, Calan: Druckschrift der Hescho 1936.
- Keramische Formteile für den Elektrowärmebedarf. Stomag-Nachrichten 1933 Heft 10.
- JUNG, H.: Elektrowärme Bd. 3 (1933) S. 172/176.
- WOLL, P.: Die Verwendung von elektrischen Rohrheizkörpern als Glühkochplatten und ihre wärmetechnischen Eigenschaften. Diss. Darmstadt 1936.
- VOIGT, H.: Elektrowärme Bd. 6 (1936) S. 90/95.
- JORDAN, F.: Die Glühkochplatte für Elektro-Haushalterde im In- und Ausland. Frankfurt: Voigt & Haefner A.-G. 1936 (weiteres Schrifttum über Backplatten).

## Glimmer und Asbest:

- MOHR, H.: Der Nutzglimmer. Berlin: Gebr. Bornträger 1930.
- SCHROEDER, R.: ETZ Bd. 54 (1933) S. 541/543.

## Allgemeines:

- VIEWEG, R. u. G. PFESTORF: ETZ Bd. 54 (1933) S. 569/572 (weiteres Schrifttum).
- Vorschriften für Elektrowärmegeräte, VDE 0720. Neufassung, Entwurf, ETZ Bd. 58 (1937) S. 26/29 u. 55/60.

## Sachverzeichnis.

- Ableitstrom 284.  
 Ablösungsarbeit 33.  
 Abschreckung von Gläsern 11.  
 Abspannisolatoren 145.  
 Aggregationsbereich 6.  
 Aggregationsvorgänge 35.  
 Akrylate 193, 207.  
 Akrylsäure 71.  
 Albit 47.  
 Aliphatische Stoffe 211.  
 — — Valenzbindung 30.  
 Alkalialumosilikate 29.  
 Alkali-Silikatglas 35.  
 Alkydale 68.  
 Alkydharze 193.  
 Aluminiumoxyd 286.  
 Alumosilikate 28.  
 Alporit 261.  
 Alterung 78.  
 — bei Porzellan 126.  
 Amberglimmer 282.  
 Amenit 244.  
 Aminoplaste 68, 239.  
 Ammoniaksynthese 190.  
 Amphibole 27.  
 Anatas 45.  
 Andalusit 39.  
 Anfangskapazität, Kondensator ohne — 88.  
 Anilin 68, 191.  
 Anilinarharze 203, 210.  
 Anker-Drahtisolation 215.  
 Anorganische Isolierstoffe 1, 121, 186, 251.  
 Anschlußleisten 240.  
 Anschmelzung, Glas-Metall 151.  
 Apyrol 214, 219.  
 Ardostan 150, 229, 271, 286.  
 Aromatische Stoffe 211.  
 — —, Molekulgitter 31.  
 Asbest 40, 67, 187, 199, 283.  
 Asbestgewebe 217.  
 Asbestzement 201.  
 Aschengehalt von Papier 159.  
 Asphalt 65, 188.  
 Astralon 118.  
 Atombindung 30.  
 Äther der Zellulose 195.  
 Äthylen 190.  
 Äthylzellulose 195.  
 Auftrag von Drahtisolationen 249.  
 Ausdehnungskoeffizient 101.  
 — von Elektrowärme-masse 262, 286.  
 Ausdehnungsschlitz 264.  
 Azetylierung 105, 196.  
 Azetylzellulose 76, 118, 243.  
 A-Zustand 162.  
 Backerrohr 259, 279, 281.  
 Bakelite 66.  
 Bandkabel 248.  
 Batist 160.  
 Baumwolle 65, 188, 195, 284.  
 Baumwollisolation auf Drähten 215.  
 Baumwollschnitzel 199.  
 Begriffserklärungen bei Kunststoffen 80.  
 Belegungen 226.  
 Benzylzellulose 76, 118, 195.  
 Berylliumoxyd 265, 286.  
 Bewertung von Isolierstoffen 83.  
 Bienenwachs 247.  
 Biegefestigkeit 118.  
 Biegewechselfestigkeit 98.  
 Bifilarbrücke 87.  
 Bindemittel 155.  
 Bitumen 188.  
 Block-Kondensatoren 147.  
 Blinkschaltung 180.  
 Bomse 140.  
 Bornsche Gittertheorie 32.  
 Bornsches Ionengitter 26.  
 Borosilikatgläser 5, 10.  
 Borsäure 1, 55.  
 Bratofen 273.  
 Brückenverfahren 85.  
 — mit selbsttätigem Abgleich 90.  
 Bügeleisen 281.  
 Buna 75, 194.  
 Bunsenflamme, Prüfung mit der — 104.  
 Bürstenbolzen, Isolierung 217.  
 B-Zustand 163.  
 Calan 139.  
 Calit 139, 187, 205, 222, 256, 286.  
 Calodur 275.  
 Carnegieit 44.  
 Cellon 77.  
 Cellophan 76.  
 Chemische Fabriken, Geräte für — 210.  
 Chemische Gesichtspunkte bei Kunstharzen 112.  
 Chamotte 53, 269.  
 Chinarsulfat 117.  
 Chlophen 77.

- Chlorierung 77.  
 Chlorkautschuk 77, 193.  
 Chloropren 75.  
 Chlorstruktur 30.  
 Chromnickel 268, 280.  
 Chromoxyd 286.  
 Chromstähle als Heizleiter 280.  
 Chrysotilasbest 41.  
 Condensa 148, 229.  
 Cordierit 53.  
 Cotopa 105, 196.  
 Coulombsche Kräfte 26, 29.  
 Cristobalit 36, 43, 268.  
 Cumaronharz 190.  
 Cyanit 39.  
 C-Zustand 163, 178.
- D**  
 Dammar 65.  
 Dartex-Verfahren 231.  
 Dauerbiegestab 100.  
 Dauererwärmung von Schellack 161.  
 Dauerfestigkeit 98.  
 Dauerhaltbarkeit 99.  
 Dauerwärmebeständigkeit 101.  
 Dauer - Wechselfestigkeit der Porzellanisolatoren 129.  
 Debyesche Theorie der dielektrischen Verluste **16, 106**.  
 Decelith 118.  
 Dehnungsschlitze in Elektrowärmekörpern 264.  
 Deltaisolatoren 126.  
 Diamantstruktur 30.  
 Diakond 148.  
 Dielektrizitätskonstante 85.  
 — von anorgan. Stoffen **12**.  
 — von organ. Stoffen **107**.  
 Dielektrische Verluste 86, **105**.  
 — — bei anorg. Stoffen **10**.  
 — — in der Elektrowärmetechnik 259.  
 — —, Trennung der Anteile 172.
- Diphenylchlorid 77.  
 Dipole **16**.  
 Disthen 39.  
 Doppelbrechung von Rutil 49.  
 — von Kunststoffen 117.  
 Doppelrohre für Kondensatoren 146.  
 Drahtisolation 211.  
 Drähte, Lack — 213, 247.  
 Drehen von Porzellan 123.  
 Drenenburg-Isolation 218.  
 Druckeinfluß auf Durchschlag 112.  
 Druckfestigkeit 118.  
 Durchbruchfeldstärke 25.  
 Durchführungen 169.  
 Durchführungen aus keram. Werkstoff 133.  
 — aus Hartpapier 171.  
 — durch keram. Stoffe 151.  
 Durchgangswiderstand 184.  
 Durchlässigkeit 73.  
 Durchreißen von Hartpapier 235.  
 Durchschlagfestigkeit 1, **18, 108**.  
 — in der Elektrowärmetechnik 256.  
 — von isolierten Drähten 248.  
 Durchschlagfiguren 109.  
 Durchschlag, elektrischer **20, 111, 258**.  
 — mechanisch-elektrischer 112.  
 — thermischer 258.  
 Dynamobleche, Isolierung 218.
- E**  
 Eigenschaftstabellen für anorgan. Stoffe 149, 285 u. am Schlusse d. Buchs.  
 — für organ. Stoffe 118, 191 u. am Schlusse d. Buchs.  
 Einbettmassen 273.  
 Einbrennen 142.  
 — von Belägen 142, 226.  
 — von Lackschichten 248.
- Eintauchen von Metallen 142.  
 Eisenoxyd 286.  
 Elastizitätsmodul 118.  
 Elektrischer Durchschlag **21, 111**.  
 Elektroden für Isolierrohre 168.  
 — für Prüfkörper 85.  
 — für Kondensatoren 142.  
 Elektrolyse von Silikaten 3.  
 Elektrolytische Leitung 171.  
 Elektrolytkondensatoren 245.  
 Elektronenleitung 111.  
 Elektronische Leitfähigkeit 2.  
 Elektrowärme, Isolierstoffe für die — 51, **251**.  
 Elektrowärmetechnik **250**.  
 Eloxalverfahren 250.  
 Empfängerbau, Isolierstoffe im — 144.  
 Empfangsgeräte 222, 242.  
 Energieverlust 1, **10**.  
 Entglasung 263.  
 Ermüdung bei Porzellan 126.  
 Etagenpresse 176.  
 Expansionsschalter 169, 185.
- F**  
 Fadenbildung 78.  
 Falzzahl 159.  
 Faserstoffe 65.  
 Faßwicklung 177.  
 Federleisten 241.  
 Fehlordnungszustände 3.  
 Feindrähte 248.  
 Feinwerktechnik 220.  
 Feldspat 44, 47, 51, 123, 257.  
 Feldspulen-Isolation 215.  
 Fernmeldetechnik, Isolierstoffe in der — **220**.  
 Fernsprechanlagen, Isolierstoffe in — **233, 240**.  
 Fernsprech-Handapparate 237.

- Feuchtigkeitsaufnahme 224.  
 — von Hartpapieren 232.  
 Feuchtigkeitseinfluß auf Glasleitfähigkeit 8.  
 Feuchtigkeitsgehalt 183.  
 Feuchtigkeitsprüfung 94.  
 Feuchtigkeitssicherheit bei keram. Stoffen 126.  
 Feuchtraumgeräte 205.  
 Feuersichere Geräte 199.  
 Filme 75.  
 Flachs 244.  
 Fließvermögen 102.  
 Flüssige Isolierstoffe 111.  
 Flußmittel 255.  
 Folien 75.  
 Formaldehyd 67, 162.  
 Form für Preßstoffe 238.  
 Formstücke 177.  
 Freileitungsisolatoren 126.  
 Freiluftschalter 172.  
 Frequenta 139, 147, 226, 256, 286.  
 Frequenzeinfluß auf Glasleitfähigkeit 8.  
 — auf dielektrische Verluste 13.  
 — bei keram. Stoffen 49.  
 Füllstoffe 67, 77.  
  
 Gasgehalt der Oberfläche bei Gläsern 9.  
 Geaphan 196, 211.  
 Gefüge von Kunststoffen 114.  
 Geschichtete Isolierstoffe für die Fernmelde-technik 231.  
 Gewebe als Träger 156.  
 Gießharz 118.  
 Gießverfahren bei Kunststoffen 78.  
 — bei Porzellan 124.  
 Gitteranomalien 32.  
 Gitterstruktur 25.  
 Glas 54, 187, 256.  
 —, Gefüge 34.  
 Glasisolatoren 55.  
 Glaskolloide 34.  
 —, Beziehung zu Kunstharzen 35.  
  
 Glaskondensatoren 56.  
 Glas, Leitfähigkeit 5.  
 Glasseide 200.  
 Glasur 125.  
 Glaswolle 211.  
 Glattbrand 140.  
 Gleichrichterbrücke 89.  
 Gleichstromleitfähigkeit 104.  
 Glimmer 41, 186, 225, 282.  
 — für Maschinenisolierung 217.  
 Glimmfunkenentladung 23.  
 Glimmlampenprüfung 174, 180.  
 Glühbrand 125.  
 Glutfestigkeit 119.  
 Glykol 190.  
 Glycerin 190.  
 Glycerin-Phthalsäure-reaktion 68.  
 Graphitheizkörper 254.  
 Graphitstruktur 31.  
 Gummi 64, 108.  
 —, Einfluß von Schwefelzusatz 107.  
 —, Kräfteverteilung im Innern 116.  
 Gummihaltige Isolierstoffe für die Fernmelde-technik 230.  
 Guttapercha 188.  
 Hadernpapiere 244.  
 Haftax 77.  
 Halbleiter 2, 34.  
 Halmkondensatoren 146.  
 Hanf 65, 244.  
 Hängeisolatoren 128.  
 Harnstoff 68, 190.  
 Harnstoffharze 210.  
 Härtegeschwindigkeit 102.  
 Härtegrad v. Preßmassen 102.  
 Härten von Hartpapier 165.  
 Härtungsdauern von Kunstharz 166.  
 Hartgewebe 118, 155, 195.  
 — in der Fernmeldetechnik 236.  
  
 Hartgummi 64, 108, 230.  
 Hartholz 118.  
 Hartpapier 118, 155.  
 — für die Fernmeldetechnik 231.  
 — und -gewebe, Eigenschaften 165.  
 Hartporzellan 46, 122.  
 Harze 65.  
 Harzgehalt von Hartpapieren 164, 176.  
 Hautdurchführung 152.  
 Hewlettisolatoren 128.  
 Heizkörper 254.  
 Heizwendel 251.  
 Herapathit 117.  
 Heteropolares Gefüge 25.  
 Hinrichsen, Gesetz von Rasch u. — 4, 34, 255.  
 Hitzebeständigkeit bei keram. Stoffen 126.  
 von Hippelsche Durchschlagversuche 22.  
 Hochfrequenzheizung in Öfen 265.  
 Hochfrequenzkabel 146.  
 Hochfrequenzmessungen 94.  
 Hochfrequenztechnik, Isolierstoffe für die — 221.  
 —, keram. Stoffe für die 144.  
 Hochschmelzende Oxyde 264.  
 Hochspannisolatoren, keramische 126.  
 —, organische 155.  
 Hochspannungsprüfung von keram. Isolatoren 136.  
 — von organ. Werkstoffen 86, 170.  
 Hochtemperaturöfen 265.  
 Holländer 157.  
 Holz 65, 157, 195.  
 Holzl 65, 188.  
 Homöopolare Gitter 29.  
 Hütchenkondensatoren 146.  
 Hydrargillit 42.  
 Hydraulische Pressen 175.



- Hydrierung 190.  
 Hydroazetat 195.  
 Hydroxyd, Magnesium-  
 280.
- Igelite 73, 118, 192.  
 Imprägniermassen 244,  
 250.  
 Indenharz 191.  
 Innere Reibung bei Glä-  
 sern 5.  
 Installationsteile a. keram.  
 Stoffen 135, 143, 199.  
 — aus organ. Stoffen  
 186, 202.  
 Interferenzringe 36.  
 Ionengitter 25.  
 Ionenleitfähigkeit bei an-  
 organ. Stoffen 3.  
 — bei organ. Stoffen 104.  
 Ionenleitung 171.  
 Ionenstoßtheorie von  
 Joffé 22.  
 Iridiumheizung 265.  
 Isobutylen 190.  
 Isolationsauftrag 213.  
 Isolatoren, kittlose 129.  
 Isolierbänder 219.  
 Isolierperlen 272.  
 Isolierschläuche 74.  
 Istrastab 279.
- Jirkondioxyd 286.  
 Joffésche dünne Schich-  
 ten 33.  
 Jute 65.
- Kaliglimmer 41.  
 Kalk 187.  
 Kalter Fluß 79.  
 Kaltpreßmaterial 203.  
 Kalzinierung von Glim-  
 mer 283.  
 Kammerofen 251.  
 Kantenverluste 171.  
 Kaolin 46, 123, 269.  
 Kapazitätssmessung 85.  
 Kappenisolatoren 128.  
 Kasein 104.  
 Katalysatoren 162.  
 Kathodenstrahloszillo-  
 graph 22, 109.
- Kathodenzerstäubung 142.  
 Kautschuk 188.  
 —, synthetischer 75, 194.  
 Kautschukartige Stoffe  
 68.  
 Keinathsche Selbstschrei-  
 ber 170.  
 Kerafar 148, 229.  
 Keramische Isolierstoffe  
 121.  
 — — für die Fernmelde-  
 technik 226.  
 — Überwürfe 181.  
 Kettenisolatoren 128.  
 Kettenstruktur 27.  
 Kieselglas 7, 56.  
 Kieselgur 261.  
 Kieselsäureglas 35.  
 Kittlose Isolatoren 129.  
 Kittung von Isolatoren  
 127.  
 Klappenschrank 240.  
 Klebearze 194.  
 Klebstoffe 73.  
 Kleinkondensatoren 146.  
 Kleinmotoren, Isolierung  
 211, 219.  
 Klemmbretter, Isolierung  
 218.  
 Klimaschrank 95.  
 Klinoenstatit 48.  
 Klöppelbefestigung 129.  
 Knüppelisolatoren 130.  
 Kochplatten,  
 — Masse- 275.  
 — Strahlungs- 253, 279.  
 — Wärmeleitungs- 253.  
 Körnung von Elektro-  
 wärmemassen 262.  
 Kohlenwasserstoffharze  
 210.  
 Kollektorbau, Isolierung  
 im — 217.  
 Kolophonium 65.  
 Kompensationsspannung  
 in der Brücke 90.  
 Kondensate 67.  
 Kondensation 191.  
 Kondensatoren für die  
 Fernmeldetechnik 227.  
 — aus Glas 56.  
 —, Elektrolyt- 245.
- Kondensatoren aus  
 keram. Werkstoff 135,  
 147.  
 — aus Hartpapier 171.  
 — für die Hochfrequenz-  
 technik 146.  
 — in der Fernmeldetechni-  
 k 245.  
 Kontaktmittel 67.  
 Konturkarte von Naph-  
 thalin 113.  
 Koordination 26.  
 Kopal 65, 241.  
 Kopfhörer 237.  
 Korrosion 102, 232.  
 — an Kontakten 206.  
 Korund 54, 261, 269.  
 Kresole 67, 190.  
 Kresolharz 162.  
 Kriechstrecken 208.  
 Kriechstromfeste Stoffe  
 208, 209.  
 Kriechstromfestigkeit 95,  
 197.  
 — bei keram. Stoffen 126.  
 Kriechstromsichere Ge-  
 räte 207.  
 Kriechstromsicherheit von  
 Maschinenteilen 218.  
 Kristalle 106.  
 Kristallgitter 25.  
 Kühlung von Gläsern 11.  
 Kugeldruckhärte 118.  
 Kunstharze 80, 162, 189.  
 —, Beziehung zu Gläsern  
 35.  
 Kunstharz-Hartpapier  
 232.  
 Kunstharzpreßstoffe in  
 der Fernmeldetechnik  
 236.  
 Kunsthorn 118.  
 Kunstseide auf Drähten  
 213.  
 Kunststein 187.  
 Kunststoffe 66.  
 — Begriffserklärung 80.  
 — Erkennung der Grup-  
 pen 103.  
 Kurzwellentechnik, Iso-  
 latoren für die — 145,  
 221.

- Laboratoriumsöfen 254.  
 Ladungsstrom 10.  
 Lackauftrag 249.  
 Lackdrähte 213.  
 Lacke 75, 181, 211.  
 Lackharze 193.  
 Lackiermaschine 163.  
 Lackleinen 246.  
 Lackpapier 245.  
 Lackrohstoffe 65, 73.  
 Lackschläuche 246.  
 Lackseide 246.  
 Lacküberzüge 205.  
 Längsbedeckungsmaschine 78.  
 Leisten aus Hartpapier 177.  
 — in der Fernmelde-  
 technik 240.  
 Leimung von Papier 159.  
 Leinen 65, 246.  
 Leinöl 65, 188.  
 Leitfähigkeit 1.  
 — an der Oberfläche 7.  
 — der Metalle 2.  
 — durch Elektronen 2,  
 111.  
 — durch Ionen 3, 104.  
 — elektrische 257.  
 — in der Masse 3, 104.  
 — unipolare, 4 19.  
 Lichtbogenüberschlag 131.  
 Litzwicklung 177.  
 Lockerstellen 33.  
 Luftdurchlässigkeit 160.  
 Luvikan 74, 118, 209, 244.  
  
**M**  
 Magnesia 266.  
 Magnesit 261.  
 Magnesiumhydro-silikat  
 47.  
 Magnesiumhydroxyd 280.  
 Magnesiumoxyd 187, 266,  
 286.  
 Magnesiumsilikat 283.  
 Magnesiumtitanate 51.  
 Mahlarten von Papier  
 158.  
 Makromoleküle 31, 70.  
 Maleinsäure 193.  
 Manilapapier 158.  
 Marmor 187, 201, 225.  
 Marquardt'sche Masse 53,  
 270, 275, 286.  
 Martensprüfung 101.  
 Martenswärme 243.  
 Marx'sche Vervielfachungs-  
 schaltung 137.  
 Maschinenisolation 216.  
 Masekochplatte 276.  
 Massen, vergießbare 65,  
 244, 250.  
 Massen zum Einbetten in  
 der Elektro-Wärme-  
 technik 273.  
 Maßgenauigkeit 223.  
 Maßhaltigkeit von keram.  
 Stoffen 121, 142.  
 Mastfußisolatoren 145.  
 Mechanisch beanspruchte  
 Geräte 197.  
 Mechanische Eigenschaf-  
 ten von Kunststoffen  
 115.  
 — Festigkeit von keram.  
 Stoffen 142.  
 — Prüfungen 97.  
 Medizinische Zwecke, Iso-  
 lierteile für — 150.  
 Mehrlochrohre 146.  
 Mehrrohrdurchführungen  
 134.  
 Melalith 138.  
 Messerleisten 241.  
 Meßkondensatoren 147.  
 Metallbelegungen 226.  
 Metallhaut-Durchführung  
 152.  
 Metallische Leitfähigkeit  
 2.  
 Methakrylsäure 73.  
 Methylester 104.  
 Methylhexalin 96.  
 Mikanit 225, 283.  
 Mikanitbänder 211.  
 Mikrophon 237, 242.  
 Mindestwerte bei Prü-  
 fungen 84.  
 Mineralöl 189.  
 Mipolam 192.  
 Mischkristallbildung 24.  
 Mischphasen 3.  
 Mischpolymerisate 73.  
 Molekülgitter 29.  
 Molybdänheizung 265.  
 Motorisolatoren 128.  
 Muffelofen 252, 274.  
 Mullit 39, 46, 270.  
 Muskwitglimmer 282.  
 Mycalex 149, 200.  
  
**N**  
 Nagelsche Kondensatoren  
 169.  
 Naphthalin, Konturkarte  
 113.  
 —, Chlorierung 77.  
 Naßpressen 124.  
 Natron-Kalksilikatgläser  
 54.  
 Natronpapier 244.  
 Natronzellstoff 157.  
 Natürliche Isolierstoffe  
 64.  
 — — für die Fernmelde-  
 technik 225.  
 Nebelprüfung 136.  
 Nekal 97.  
 Nephelin 44.  
 Nessel 160.  
 Netzgebilde 28.  
 Netztheorie der Gläser 37.  
 Nibren 77.  
 Nickel als Heizdraht 280.  
 Niederspannungsgebiet f.  
 die Elektrowärme 259.  
 Nitrozellulose 118.  
 Nockenschalter 229.  
 Nockenscheiben 236.  
 Normalkondensator 88.  
 Normalspulen 148.  
 Normalstab 100.  
 Normblätter 69.  
 Novolack 67, 163.  
 Nutenisolierung 218.  
 Nutenkeile 218.  
  
**O**  
 Oberflächengüte von  
 Preßstoffen 223.  
 Oberflächenleitung 7.  
 Oberflächenschutz 181.  
 Oberflächenschutzmittel  
 75.  
 Oberflächenwiderstand  
 119.  
 Ofen, Elektrowärme- 251.  
 Öle 64, 188.

- Öllack 245.  
 Ölschalter 168.  
 Oppanol 74, 118.  
 Organische Isolierstoffe  
 61, 155, 186, 220.  
 Osmotischer Druck 71.  
 Oxyde in der Elektro-  
 wärmetechnik 254.  
 Ozokerit 65.
- Papier als Träger 156.  
 — in der Fernmeldetechnik 244.  
 Papierisolation auf Drähten 215.  
 Papierkondensatoren 245.  
 Papier, Mahlungsarten 158.  
 Paraffin 104, 244, 247.  
 Paulingsche Strukturbestimmung 41.  
 Pech 65, 191.  
 Perduren 68, 75, 195.  
 Perlenisolierung 272.  
 Pertinax 66.  
 Pflanzenöle 188.  
 Phenol 67, 190, 237.  
 Phenolharz 162.  
 Phenoplaste 67.  
 — in der Fernmeldetechnik 237.  
 Phlogopit 282.  
 Phthalsäure 68, 193.  
 Pimpel 230.  
 Platinheizung 265, 275.  
 Plexigum 71, 118.  
 Polare Moleküle 16.  
 Polarisationsfilter 117.  
 Polyakrylate 71, 118, 210.  
 Polykondensation 67.  
 Polymerisation 67.  
 Polymerisationsgrad 70.  
 Polymerisationsvorgänge 35, 70.  
 Polystyrol 70, 118.  
 Polyvinyle 73, 210.  
 Porige Isolierstoffe 173.  
 Porzellan 46, 52, 122.  
 187, 256, 286.  
 — bei Feuchtraumgeräten 205.  
 Potentialgitter 27.
- Pressen von Platten 175.  
 — von Porzellan 123.  
 Preßharze 207.  
 Preßleisten 241.  
 Preßmassen 190, 202.  
 Preßstoffe aus Kunstharzen 69, 236.  
 Preßtechnik 223.  
 Preßverfahren bei Kunststoffen 77.  
 — bei Porzellan 123.  
 Propylen 190.  
 Protodur 74.  
 Prüfkörper 85.  
 — für Porzellan 125.  
 Prüfung von Isolierstoffen 88.  
 Pyranol 77.  
 Pyrex 55.  
 Pyrexglas 8.  
 Pyrometerschutzrohr 265.  
 Pyrophyllit 42.  
 Pyroxene 27, 48.
- Quarz 123.  
 — in der Elektrowärmetechnik 267.  
 Quarzglas 45, 267, 286.  
 Quarzglas 149, 267.  
 Quarzkristall 43.  
 Quellgummi 230.  
 Querlochkörper 134.  
 Quetschtrimmer 229.
- Ramie 65.  
 Rasch-Hinrichsensches Gesetz 4, 34, 255.  
 Realkristalle 32.  
 Reckung von Drähten 249.  
 Regenüberschlag 136.  
 Registrierverfahren für Durchschlagvorgänge 110.  
 Reibung, innere, bei Gläsern 5.  
 Reinharz 207.  
 Reißlänge von Papier 159.  
 Relais für die Fernsprechtechnik 232.  
 Resol 67, 162.  
 Restladungen 11.
- Rheostit 286.  
 Rippen bei Konstruktionen 197.  
 Rogowskische Durchschlagversuche 10, 22.  
 Röhrenkondensatoren 146.  
 Röhrensockel 222, 229.  
 Rohrheizkörper 278.  
 Röntgenaufnahme eines Handapparats 241.  
 Röntgenuntersuchung an Gläsern 36.  
 — an organ. Stoffen 113.  
 — an Porzellan 46.  
 Rösch gemahlenes Papier 158.  
 Rotorstäbe 219.  
 Rundfunkstörungen 132.  
 Rutil 32, 45, 148, 187.
- Satinieren 159.  
 Saugfähigkeit von Papier 159.  
 Schachtkabel 79.  
 Schaltachsen 242.  
 Schalter 168, 185.  
 Schalthebel aus Aminoplast 239.  
 Schamotte 53, 251, 261, 269.  
 Scheibenkondensatoren 146.  
 Scheibentrimmer 229.  
 Schellack 65, 160, 182.  
 Scherben 254.  
 Scheringsche Brücke 90, 63, 86, 170, 259.  
 Schichtstruktur 31.  
 Schiefer 187, 202, 225.  
 Schienenbremse, Isolierung 217.  
 Schlackenreaktion 269.  
 Schlagbiegefestigkeit 118.  
 — bei keram. Stoffen 142.  
 Schläuche, Isolier- 246.  
 Schleifen von keram. Stoffen 141.  
 Schlierenbildung 56.  
 Schliffe von keram. Stoffen 46.  
 — von Kunststoffen 114.

- Schlingenisolatoren 128.  
 Schmierig gemahlenes Papier 158.  
 Schnurloser Klappenschrank 240.  
 Schoopsches Spritzverfahren 142.  
 SchreibendeMeßgeräte 88.  
 Schrifttum zu anorgan. Stoffen 57.  
 — zu Kunststoffen 81.  
 — zu keram. Isolierstoffen 153.  
 — zu Elektrowärme-Isolierstoffen 287.  
 Schrumpfung 101.  
 — von Lacken 182.  
 Schutzarmaturen 131.  
 Schütz, Isolation 216.  
 Schwindung 124.  
 Schwingkontaktgleichrichter 89.  
 Seide 65, 246, 284.  
 Seidenisolation auf Dräh-  
 ten 215.  
 Senderbau, Isolatoren im  
 — 135.  
 —, Isolierstoffe im — 145.  
 Serpentinastbest 41.  
 Sicherheit 84.  
 Silberglimmerkondensatoren 226.  
 Silikate 1, 27.  
 Siliziumdioxyd 286.  
 Sillimanit 39, 261, 269,  
 286.  
 Sinterkorund 54, 261, 266,  
 286.  
 Sinterung 124, 254.  
 Sipa 151, 229, 271, 286.  
 Smekalsche Lockerstellen  
 33.  
 Spannungsoptische Prü-  
 fung 117.  
 Speckstein 47, 122, 270,  
 286.  
 Specksteinerzeugnisse 142.  
 Speicherfähigkeit 263.  
 Spezifisches Gewicht 118.  
 Spezifischer Widerstand  
 von anorgan. Stoffen 5.  
 — von organ. Stoffen 104.  
 Spritzgußmassen 190.  
 Spritzgußverfahren 78.  
 Spritztechnik 238.  
 Spulendrahtisolation 215.  
 Spulenkörper aus Hart-  
 papier 236.  
 — aus keram. Stoffen  
 144, 148.  
 Staböl 72, 193.  
 Stanzen von Hartpapier  
 234.  
 Stanzgrat 231.  
 Stanztechnik 223.  
 Stapelfaser 160, 195.  
 Statorspulen 219.  
 Staubsaugergehäuse 197.  
 Stauen von Armaturen  
 142.  
 Staudingersche Lehre 70.  
 Steatit 47, 187, 205, 270,  
 286.  
 Steinsalz, elektr. Verhal-  
 ten 22, 106.  
 — Gitterstruktur 26.  
 Sterchamol 261.  
 Stocklack 160.  
 Stoßdurchschlagspan-  
 nung 128.  
 Stoßspannungsprüfung  
 136.  
 Strahlungskochplatte 253.  
 Strangpressen bei Kunst-  
 stoffen 78.  
 — bei Porzellan 123.  
 Stückprüfung 136.  
 Stützenisolatoren 127.  
 Stützer 133.  
 Styroflex 71.  
 Styrol 70, 190.  
 Substituenten im Gitter  
 34.  
 Sulfitpapier 244.  
 Sulfitzellstoff 157.  
 Superdia 261.  
 Super-Hartpapier 165,  
 184, 232.  
 Sylvin 106.  
 Synthetischer Kautschuk  
 75, 194.  
 Talk 47, 121.  
 Tammann-Ofen 264.  
 Tauchsieder 268, 283.  
 Technische Vereinigung  
 69.  
 Telephon 237, 242.  
 Tempa 148.  
 Temperaturabhängigkeit  
 der Dielektrizitätskon-  
 stante 13, 50.  
 — der Durchschlagsspan-  
 nung 20.  
 — der Leitfähigkeit 5.  
 — der Verluste 20, 173.  
 Temperaturbeständigkeit  
 in der Elektrowärme-  
 technik 254.  
 Temperaturkoeffizient der  
 DK bei keram. Stoffen  
 149.  
 —, negativer der DK 50.  
 Terpentinöl 65.  
 Tetraedrische Konfigura-  
 tion 27.  
 Thermische Eigenschaften  
 99.  
 Thermischer Ausdehn-  
 ungskoeffizient 101.  
 Thermisches Wattmeter  
 92.  
 Thermometer, Wider-  
 stands- 269.  
 Thermoplastische Harze  
 191.  
 Thomsonsche Schutzringe  
 171.  
 Thoriumdioxyd 265, 286.  
 Tiegelofen 275.  
 Titanate 1, 45, 148.  
 Toleranzen bei Porzellan  
 124.  
 Ton 269.  
 Tonerde 55, 187.  
 Tonsubstanz 53.  
 Trägerstoffe 77.  
 Tränkmassen 244, 250.  
 Tränkmittel 155.  
 Tränkstoffe 73.  
 Transformationsgebiet 6.  
 Tremolit 40.  
 Trennschalter 168.  
 Trennschärfe 222.  
 Triazetat 76, 196.  
 Tridymit 44.

- Trimmerkondensatoren 229.  
 Trockenpressen 124, 139.  
 Trockenüberschlag 136.  
 Trolitul 70, 118, 243.  
 — Lu 74, 244.  
 Tropenfestigkeit 183.  
 Tropensicherheit 94.  
 Tüpfel 157.  
 Turbogenerator, Wicklung 177.  
 Turmalin 107.  
 Typenprüfung 136.  
 Typen von Isolierstoffen 69, 202, 237.  
 Typisierung 69, 84, 190.  
 Überschlagspannung von Isolatoren 131.  
 Überwachungszeichen 84.  
 Überwürfe 181.  
 Ultrazentrifuge 71.  
 Umspinnung von Drähten 248.  
 Unpolare Gitter 29.  
 Unterkühlung 12.  
 Vakuumdichte Verschmelzung, Keramik-Metall 152.  
 Vakuumschalter 222.  
 Valenzelektronen 30.  
 Vaseline 244.  
 VDE-Vorschriften 62, 83, 169, 181, 211, 285.  
 Verbundstoffe 67.  
 Vergießbare Massen 65, 85, 244, 250.  
 Vergußharze 118.  
 Verluste, dielektrische 86, 105.  
 — — bei anorgan. Stoffen 10.  
 — — in der Elektrowärmetechnik 259.  
 Verluste von Hartpapieren 167.  
 Vernetzung von Kunststoffmolekülen 71.  
 Versilberung 142.  
 Versteifungsrippen 197.  
 Vinyl 73, 193, 207.  
 Viskosität von Gläsern 5.  
 Vollkernisolatoren 128.  
 Vulkanfaser 118.  
 — für Maschinenisolationen 217.  
 Vulkanisierung 77.  
 Wachs 65.  
 Wachse 77, 244.  
 Wagnersche Theorie der dielektrischen Verluste 13, 106.  
 Wähler 223, 224.  
 Walzenschalter 235.  
 Wärmebeständigkeit 203.  
 Wärmedurchschlag 18, 256.  
 Wärmefestigkeit 101.  
 Wärmeleitfähigkeit 101.  
 — in der Elektrowärmetechnik 260, 286.  
 Wärmeleitvermögen 18, 203.  
 Wärmetechnik, Elektro-251.  
 Wärmevorgeschichte 11.  
 Wärmewiderstand 204.  
 Warren-Zachariasensche Netztheorie 38.  
 Wasseraufnahme 101, 206, 224.  
 — von Hartpapieren und -geweben 170.  
 Wasserdurchlässigkeit 73, 182.  
 Wassergehalt von Zelluloid 14.  
 Wasserhaut 7.  
 Wasserwiderstand 135.  
 Wattmeter, thermisches 92.  
 Wechselbeständigkeit, Temperatur-262.  
 Wechselfestigkeit 98.  
 — bei keram. Stoffen 126.  
 Wecker 239.  
 Weichmacher 74, 77.  
 Weitschirmisolatoren 127.  
 Wendel in der Elektrowärmetechnik 251.  
 Wetterbeständigkeit 133.  
 Wickeldrähte 248.  
 Wickellocke 247.  
 Wickeln von Hartpapieren 165.  
 Wickelraum 249.  
 Wicklungsisolierung 218.  
 Widerstand im Inneren 118.  
 Widerstand, spezifischer von Isolierstoffen in der Elektrowärmetechnik 255.  
 Widerstandsthermometer 269.  
 Wurtzit 45.  
 Yield point 101.  
 Zachariasen-Warrensche Netztheorie 38.  
 Zähigkeit von Harzen 163.  
 — von Kunststofflösungen 71.  
 Zahlenwerte von anorg. Stoffen 149, 285 und am Schlusse des Buchs.  
 — von organ. Stoffen 118, 191 und am Schlusse des Buchs.  
 Zellstoff 157.  
 Zelluloid 118.  
 — Wassergehalt und Verluste 14.  
 Zellulose 65, 75, 195.  
 Zelluloseester 194.  
 Zelluloselack 246.  
 Zinndioxyd, Mischkristalle mit Rutil 51.  
 Zirkondioxyd 149, 265.  
 — Mischkristalle mit Rutil 51.  
 Zirkularpolarisation bei Quarz 43.  
 Zollsysteem, Werte im — 120.  
 Zugfestigkeit 118.  
 Zusammenbau von Hartpapier 234.  
 Zusammenglasieren 141.  
 Zwischenbearbeitung 140.

Additional information of this book

(*Elektrotechnische Isolierstoffe ; 978-3-662-27310-4*) is provided:



<http://Extras.Springer.com>

**Werkstoffkunde der Hochvakuumtechnik.** Eigenschaften, Verarbeitung und Verwendungstechnik der Werkstoffe für Hochvakuumröhren und gasgefüllte Entladungsgefäße. Von Oberingenieur Dr. phil. **W. Espe**, Berlin, und Dozent Dr.-Ing. **M. Knoll**, Berlin. Mit 405 Textabbildungen und einer mehrfarbigen Tafel. VIII, 383 Seiten. 1936. Gebunden RM 48.—

---

**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 Prof. Dr. **H. Schering**. Mit 197 Abbildungen im Text. IV, 392 Seiten. 1924. Gebunden RM 14.40

---

**Das flüssige Dielektrikum** (Isolierende Flüssigkeiten). Von Priv.-Doz. Dr.-Ing. **A. Nikuradse**, Berlin. Mit 82 Textabbildungen. VII, 226 Seiten. 1934. RM 18.— ; gebunden RM 19.50

---

**Elektrophysik der Isolierstoffe.** Von Priv.-Doz. Dr. **Andreas Gemant**, Berlin. Mit 76 Textabbildungen. VI, 222 Seiten. 1930. RM 18.— ; gebunden RM 19.35

---

**Die Materialprüfung der Isolierstoffe der Elektrotechnik.** Herausgegeben von Oberingenieur **W. Demuth** unter Mitarbeit der Oberingenieure **H. Franz** und **K. Bergk**. Zweite, vermehrte und verbesserte Auflage. Mit 132 Abbildungen im Text. VIII, 254 Seiten. 1923. Gebunden RM 10.80

---

**Die Eigenschaften elektrotechnischer Isoliermaterialien in graphischen Darstellungen.** Eine Sammlung von Versuchsergebnissen aus Technik und Wissenschaft. Von Dr. **U. Retzow**. Mit 330 Abbildungen. VI, 250 Seiten. 1927. Gebunden RM 21.60

---

**Gummifreie Isolierstoffe.** Technisches und Wirtschaftliches. Unter Mitarbeit von Fachgenossen verfaßt von Dr.-Ing. **A. Sommerfeld**. Mit zahlreichen Abbildungen. 103 Seiten. 1927. RM 2.52

---

**Die physikalischen Grundlagen der elektrischen Festigkeitslehre.** Von **N. Semenoff** und **A. Walther**. Mit 116 Textabbildungen. VII, 168 Seiten. 1928. Gebunden RM 14.85

---

**Elektrische Festigkeitslehre.** Von Prof. Dr.-Ing. **A. Schwaiger**. Zweite, vollständig umgearbeitete und erweiterte Auflage des „Lehrbuchs der elektrischen Festigkeit der Isoliermaterialien“. Mit 448 Textabbildungen, 9 Tafeln und 10 Tabellen. VIII, 474 Seiten. 1925. Gebunden RM 24.30

---

Verlag von Julius Springer in Berlin

---

**Deutsche Austausch-Werkstoffe.** Von Prof. Dipl.-Ing. **H. Bürgel**  
VDI, VAM, Chemnitz. (Schriftenreihe Ingenieurfortbildung, zweites Heft.) Mit  
84 Abbildungen und 23 Zahlentafeln. VIII, 154 Seiten. 1937. RM 6.60

---

**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

---

**Mitteilungen der Porzellanfabrik Ph. Rosenthal & Co.  
A.-G.**

Heft 6: **Über die Entladungsvorgänge auf Isolatoren.** Von A. Schwaiger. Mit 23 Textabbildungen. 23 Seiten. 1925. RM 1.35

Heft 8: **Über Zerstörungs- und Alterungserscheinungen an Porzellanisolatoren.** Von K. Draeger. Mit 16 Textabbildungen. IV, 36 Seiten. 1926. RM 2.16

Heft 13: **Über einige Fragen zur Isolierung von Hochspannungsfreileitungen.** Von K. Draeger. Mit 22 Textabbildungen. 40 Seiten. 1928. RM 1.80

Heft 15: **Lichtbogenüberschläge hoher Leistung an Freileitungsisolatoren ohne Schutzvorrichtungen.** Von K. Draeger. Mit 36 Textabbildungen. 42 Seiten. 1929. RM 2.52

Heft 16: **Lichtbogenüberschläge hoher Leistung an Freileitungsisolatoren mit Schutzvorrichtungen.** Von K. Draeger. Mit 48 Textabbildungen. 43 Seiten. 1930. RM 2.52

---

**Die Porzellan-Isolatoren.** Von Prof. Dr. **Gustav Benischke.** Zweite, erweiterte Auflage. Mit 162 Textabbildungen. 116 Seiten. 1923.  
RM 4.32; gebunden RM 5.04

---

**Plastische Massen.** Herstellung, Verarbeitung und Prüfung nichtmetallischer Werkstoffe für spanlose Formung. Von Dr.-Ing. **A. Sommerfeld.** Mit 165 Abbildungen. XI, 346 Seiten. 1934. Gebunden RM 28.—

---

**Elektrotechnik und Witterung.** Von Dr. **Ulrich Retzow.** Mit 13 Abbildungen im Text. V, 121 Seiten. 1936. RM 6.60

---

Zu beziehen durch jede Buchhandlung