

Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins
Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke
Band: 21 (1930)
Heft: 7

Artikel: Beitrag zur Härteprüfung von Isolierstoffen (Hartpapier und Presspan)
Autor: Stäger, H. / Tschudi, H.
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-1061310>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 03.04.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Beitrag zur Härteprüfung von Isolierstoffen (Hartpapier und Presspan).

Bericht erstattet von Dr. H. Stäger, Baden und Ing. H. Tschudi, Rapperswil.
(Mitteilung der Kommission 19 (Isolierstoffe der Elektrotechnik) des Schweiz.
Verbandes für die Materialprüfungen der Technik.)

620.1:621.315.614

Die Autoren geben die Resultate von unter verschiedenen Prüfbedingungen durchgeführten Härteprüfungen an faserigen, gepressten Isolierstoffen bekannt, diskutieren diese Resultate und die zur Verfügung stehenden Prüfeinrichtungen und leiten daraus Vorschläge für Richtlinien zu Härteprüfungen an Isoliermaterialien ab.

Les auteurs communiquent les résultats d'essais de dureté effectués dans des conditions diverses sur des matières isolantes fibreuses pressées, discutent ces résultats et les installations d'essai, pour en déduire des propositions sous forme de directives concernant l'essai de dureté des matériaux isolants.

Die Kommission 19 des Schweiz. Verbandes für die Materialprüfungen der Technik befasst sich mit der Ausarbeitung und Vereinheitlichung der Prüfmethode für Isolierstoffe. Neben verschiedenen anderen Problemen, die durch Gemeinschaftsarbeit behandelt und der Lösung entgegengeführt werden sollen, wurde durch einen Unterausschuss die Härteprüfung von geschichteten und presspanähnlichen faserigen Isolierstoffen mit und ohne Bindemittel eingehend untersucht. In den bis heute vorhandenen Vorschriften zur Begutachtung von solchen Materialien (englische Vorschriften; Prüfvorschriften des V. D. E., im Vorschriftenbuch des V. D. E. findet sich ein Hinweis) ist die Prüfung der Härte nicht behandelt, obschon dieser Eigenschaft bei der Verarbeitung und Anwendung solcher Isolierstoffe eine beachtliche Bedeutung zukommt. Die mit der Härte zusammenhängende Zusammendrückbarkeit ist bei der Konstruktion von elektrischen Maschinen für die richtige Dimensionierung gewisser Isolationsteile unter Umständen sehr wichtig. Im Transformatorbau sind diese Eigenschaften ebenfalls von Bedeutung, da bei Unterlagsscheiben und Distanzierungen die Härte beim Zusammenpressen und Anziehen der Pressschrauben ausschlaggebend ist. Durch die Bestimmung der Härte in den verschiedensten Zuständen, feucht, trocken und warm, bekommt man einen Vergleich der verschiedenen Materialien in bezug auf ihre Stabilität gegenüber äussern Einflüssen.

Nach dem Vorschriftenbuch des V. D. E. soll bei solchen Isoliermaterialien, wie sie hier besprochen werden sollen, die sogenannte Kugeldruckhärte bestimmt werden, mit einer Stahlkugel von 5 mm Durchmesser ($D = 0,5$ cm) und einem konstanten Druck von $P = 50$ kg. Gemessen wird die Eindringtiefe h nach 10 und nach 60 s. Aus dieser Eindringtiefe wird der Härtegrad H in kg/cm^2 nach folgender Formel bestimmt:

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

Die Eindrücke zur Bestimmung der Härte sollen in der Mitte von 15 mm breiten Probestreifen liegen.

Dem gegenüber hat s. Z. Meyer¹⁾ vorgeschlagen, die Härtebestimmung nicht mit einer Kugel durchzuführen, da die Streuungen zu gross sein sollen, sondern mit einem Stempel von 9,5 mm Durchmesser.

Ein Unterausschuss der Kommission 19 des Schweiz. Verbandes für die Materialprüfungen der Technik beschäftigte sich nun neuerdings mit der Frage der Härteprüfung unter Berücksichtigung der oben erwähnten Arbeiten und Vorschläge. Der erste vorläufige Bericht soll hiemit den Fachgenossen vorgelegt werden.

Versuchsprogramm.

In Anlehnung an die beiden oben kurz erwähnten bis heute vorgeschlagenen Prüfverfahren wurde folgendes Versuchsprogramm ausgearbeitet, nach dem unsere Versuche durchgeführt werden sollten:

¹⁾ E. T. Z. 1922, S. 1285.

a) *Prüfart*: Es ist zu untersuchen, welche Prüfmethode bei den günstigsten Verhältnissen und den einwandfreiesten, reproduzierbarsten Bedingungen die geringsten Messfehler und Streuungen ergibt. Ferner ist der geeignetste Prüfdruck und der beste Druckkörper (Kugel oder Stempel) festzustellen.

b) *Prüfapparate*: Zur Prüfung wurden verwendet: Der Kugeldruckhärteprüfer von Schopper, Bauart Martens, mit einer maximalen Druckkraft von 3000 kg und Eindringtieftennmesser von 0 bis 0,6 mm, Teilung 1/500 mm. — Kugeldruckpresse von Schopper mit folgenden Druckkraftstufen: 250 kg, 187,5 kg, 62,5 kg und

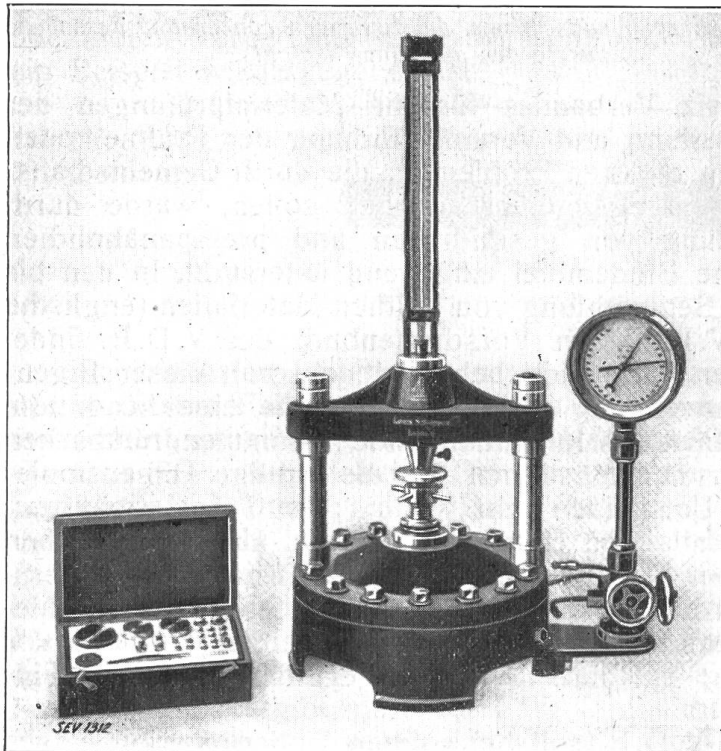


Fig. 1.
Kugeldruckhärteprüfer von Schopper, Bauart Martens.

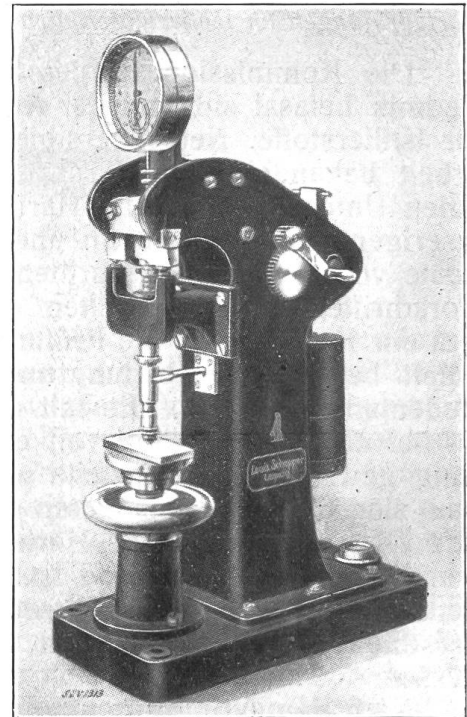


Fig. 2.
Kugeldruckpresse von Schopper, mit
4 Druckkraftstufen.

15,63 kg. — Die Maschine erster Bauart ist in Fig. 1 und die zweite in Fig. 2 wiedergegeben. — Als Druckkörper wurden Kugeln (Stahl) von 2,5 mm, 5 mm und 10 mm Durchmesser verwendet. Als Stempel (Stahl) solche von 5 mm und 9,5 mm Durchmesser, letzterer im Anschluss an die oben erwähnten Untersuchungen von Meyer.

c) *Untersuchte Materialien*: Als geschichtete Materialien mit Bindemittel wurden untersucht: Hartpapierplatten, die bei Pressdrucken von 125 und 250 kg/cm² hergestellt worden sind, in Dicken von 1 mm, 5 mm, 20 mm. Rohre mit einem Rohrdurchmesser von 200 mm und Dicken von 3, 5 und 20 mm. — Als papierartige Isoliermaterialien wurden untersucht: Pressspan und sogenannter Transformatorenboard in Dicken von 1 mm, 2 mm, 3 mm und 10 mm.

Die erste Gruppe (Hartpapierplatten und Hartpapierrohre) der bei unseren Untersuchungen verwendeten geschichteten Isolierstoffe besteht aus aufeinander geschichteten Papierblättern (Cellulosefasern), die als Bindemittel einseitig mit sogenanntem Kunstharz beklebt sind. Das verwendete Bindemittel gehört zu den künstlichen Harzen vom Typus der Kresolformaldehyd-Kondensationsprodukte. Diese lassen sich unter Anwendung von Hitze in einen unlöslichen und unsmelzbaren Zustand überführen. Um das Hartpapier möglichst dicht zu bekommen, wurde bei der einen Versuchsreihe ein Pressdruck während der Herstellung von 125 kg/cm²

und bei der andern Versuchsreihe 250 kg/cm² angewendet. Diese sogenannte Härtung der Kunstharze, die beim Herstellungsprozess sich abspielt, ist abhängig von der Zusammensetzung des verwendeten Harzes. Die Härte von Hartpapieren ist daher in hohem Masse abhängig von der Art der Rohstoffe, der Menge Kunstharz im Verhältnis zum Papier und den Fabrikationsverhältnissen (Pressdruck, Temperatur der Pressplatten). Die untersuchten Hartpapierrohre werden ebenfalls aus einseitig mit Harz bestrichenen Papierbahnen auf entsprechenden Wickelmaschinen hergestellt. Der Pressdruck ist geringer als derjenige der bei den Hartpapieren angewendet wird. Auch ist das Verhältnis Kunstharz zu Papier ein anderes als bei Hartpapier.

Die Materialien der zweiten Gruppe sind aus Papierschichten aufgebaut, welche nass und ohne Zusatz von Kunstharz zusammengepresst werden, wobei die auf der Oberfläche noch hervorstehenden Fasern sich gegenseitig festhalten. Die einzelnen Fasern sind gegenseitig verschlungen und werden zudem meist noch durch Zusätze von ölbeständigem Klebstoff zusammengehalten. Auf die Pressung der Tafeln in nassem Zustande folgt eine Trocknung und weiteres Zusammenpressen durch starke Walzwerke, wobei die Oberfläche der Tafeln geglättet wird. Bei Pressspan wird die Oberfläche nachträglich noch mit Achatsteinen poliert und erhält dadurch eine hochglänzende geschlossene Struktur.

Transformatorboard hat keine Politur. Die verwendeten Fasern sind bedeutend länger und kräftiger als bei Pressspan, weshalb der Zusammenhang derselben viel besser ist und daher kann auf die Verwendung eines Klebstoffes oder Bindemittels verzichtet werden. Die Verarbeitung dieses Faserrohmaterials ist aber bedeutend schwieriger und erfordert die Verwendung stärkster Maschinen. Es ist möglich, je nach dem Anwendungsgebiet die Tafeln härter oder weicher zu gestalten, wobei mit zunehmender Weichheit, d. h. abnehmender Dichte des Materials, die Durchdringung mit Transformatoröl bei einer nachträglichen Imprägnierung intensiver ist. Diese Anpassungsmöglichkeit besteht für Pressspan in viel geringerem Masse und erlaubt Transformatorboard von bedeutend höherer Dehnbarkeit und Biegefestigkeit herzustellen.

Probeentnahme: Die Hartpapierplatten, Pressspan- und Transformatorboard wurden in Tafeln von 500 × 500 mm hergestellt. Hievon wurden Streifen von 100 mm Breite in der Richtung der Diagonalen herausgeschnitten und von Ecke zu Ecke gleichmässig verteilt, je 6 bis 10 Proben ausgeführt. Die Hartpapierrohre waren mit einem Durchmesser von 200 mm gewickelt worden. Aus ihnen wurden Segmente von 100 mm Breite und 50 mm Schnurlänge herausgeschnitten. Sämtliches Material wurde der normalen Fabrikation des Sommers 1929 entnommen. Die Anordnung der Probeentnahmen ist aus Fig. 3 und Fig. 4 zu ersehen.

d) *Prüfzustand*: Da die Härte mehr oder weniger vom Prüfzustand abhängig ist, so wurden verschiedene Zustände untersucht:

1. Anlieferungszustand bei 20^o C,
2. Anlieferungszustand nach einstündiger Erwärmung auf 90^o und sofortiger Untersuchung bei 20^o C,
3. Nach 72-stündiger Trocknung bei 105^o C,
4. Nach 8-tägiger Lagerung in 65 % relativer Luftfeuchtigkeit,
5. Nach 8-tägiger Lagerung in 100 % relativer Luftfeuchtigkeit.

Ausgeführte Untersuchungen, Auswertung der Versuchsergebnisse.

Vorversuche: Auf Grund früher bekannt gewordener Versuchsergebnisse sollte zuerst der Einfluss der sogenannten „Nachwirkung“ festgestellt werden. Bei den

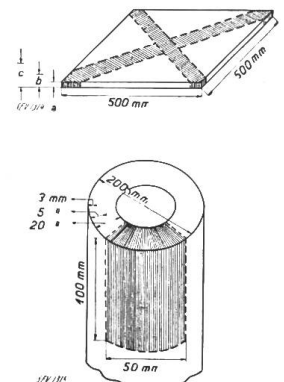


Fig. 3 und 4.

Probeentnahme.

- a 1 mm für Hartpapierplatten
- b 5 mm für Hartpapierplatten
- c 20 mm für Hartpapierplatten
- a 1 und 2 mm für Pressspan und Transformatorboard
- b 3 mm für Pressspan und Transformatorboard
- c 10 mm für Pressspan und Transformatorboard

hier vorliegenden künstlich hergestellten geschichteten Stoffen ist das Gefüge nicht dicht, sondern grob und weitmaschig. Dementsprechend ist die Durchführung der Kugeldruckprobe wesentlich schwieriger als bei den kristallin gebauten dichten Metallen. Es konnten denn auch bei den Vorversuchen bereits Unterschiede zwischen den Hartpapieren einerseits und Pressspan und Transformatorenboard andererseits festgestellt werden.

Um den Einfluss des Gefüges auf das Ergebnis der Härteprüfung festzustellen, wurde durch verschiedene Dauerversuche von 72 Stunden gezeigt, dass Pressspan und in geringerem Masse auch Hartpapier sich nur sehr langsam einem endgültigen Wert für die Eindringtiefe nähern. Das Eindringen (y) einer Kugel bei konstantem Druck ergab in Funktion der Zeit (x) eine logarithmische Kurve von der Art $y = a \cdot \log x + b$, wobei a und b (siehe Fig. 5 a und b) Materialkonstanten sind, welche beim Hartpapier vom verwendeten Harz, vom Harzgehalt und von der Fabrikationsart abhängen. Bei Pressspan und Transformatorenboard schwanken diese Konstanten je nach der Mischung der Fasern und der Pressung bei der Fabrikation.

Es mussten bei den weiteren Untersuchungen daher bei jedem Druckversuch mehrere Eindringtiefen in Funktion der Zeit aufgenommen werden.

Im weiteren ergab sich, dass die Material-Zusammenpressung während des Versuches nicht bleibend ist, sondern zum grössten Teil nur elastisch. Es müssen daher neben diesen Eindringtiefen auch noch die bleibenden Eindringtiefen nach zwei zeitlich bestimmten Belastungen notiert werden. Diese verschiedenen Erscheinungen, die bei der Härteprüfung solcher faseriger Isolierstoffe festgestellt werden konnten, bedeuteten eine wesentliche Erschwerung der vorgesehenen Arbeiten. Es wurde daher in der ersten Reihe der Hauptversuche die Unterschiede zwischen Hartpapier, das bei 125 bzw. 150 kg/cm² hergestellt wurde, und zwischen Pressspan und Transformatorenboard zu ermitteln versucht (vergl. Tabellen Ia bis Id).

Die Untersuchung der mit verschiedenen Pressdrücken hergestellten Pressplatten hat ergeben, dass der Pressdruck innerhalb der hier in Betracht kommenden Grössenordnung für die Härte keinen wesentlichen Einfluss mehr hat. Es wurden daher im Laufe der weiteren Untersuchungen nur noch diejenigen Platten verwendet, die

Pressspan W.

Vergleich über den Einfluss der Nachwirkung bei der Messung I nach 10 s und II nach 60 s.
Anlieferungszustand. Temperatur 20°C, Kugel \varnothing 5 mm, 50 kg Belastung.

Tabelle Ia.

Dicke mm	Probe	Zahl Versuche	Eindringtiefen				Nachwirkung mittel Δ 60 s und 10 s	Differenz zwischen Min. und Max. Wert	
			Wert 10 s		Wert 60 s			10 s	60 s
			Min.	Max.	Min.	Max.			
1	35 A	5	0,245	0,268	0,248	0,270	0,0028	0,023	0,022
1	35 B	5	<i>0,214</i>	0,235	0,218	0,237	0,0016	0,021	0,019
1	35 C	10	0,218	<i>0,370</i>	0,220	0,373	0,0029	0,152	0,153
2	18 A	5	<i>0,306</i>	0,375	0,309	0,378	0,0028	0,069	0,069
2	18 B	5	0,339	0,541	0,342	0,544	0,0038	0,202	0,202
2	18 C	10	0,360	<i>0,588</i>	0,366	0,591	0,0047	0,228	0,225
3	3 A	5	0,452	<i>0,534</i>	0,461	0,541	0,0068	0,082	0,080
3	3 B	5	<i>0,354</i>	0,421	0,399	0,433	0,0166	0,067	0,034
3	3 C	10	0,383	0,492	0,387	0,496	0,0088	0,109	0,109
1	103 A	5	0,489	0,568	0,514	0,580	0,0028	0,079	0,066
1	103 B	5	0,464	0,526	0,495	0,534	0,0038	0,062	0,039
1	103 C	10	<i>0,422</i>	<i>0,581</i>	0,428	0,584	0,0047	0,159	0,156

Die kursiv gesetzten Werte ergeben die Streuung zwischen den Versuchsgruppen.

Transformatorenboard.

Vergleich über den Einfluss der Nachwirkung bei der Messung I nach 10 s und II nach 60 s.
Anlieferungszustand. Temperatur 20° C, Kugel Φ 5 mm, 50 kg Belastung.

Tabelle Ib.

Dicke mm	Probe	Zahl Versuche	Eindrucktiefen		Nachwirkung		Differenz zwischen		
			Wert 10 s	Wert 60 s	mittel	Min. und Max. Wert			
			Min.	Max.	Min.	Max.	Δ 60 s und 10 s	10 s	60 s
1	94 A	5	0,222	<i>0,265</i>	0,224	<i>0,269</i>	0,0032	0,043	0,045
1	94 B	5	0,197	<i>0,251</i>	0,199	<i>0,254</i>	0,0022	0,054	0,055
1	94 C	10	<i>0,177</i>	0,209	<i>0,178</i>	0,212	0,0021	0,032	0,034
2	66 A	5	<i>0,357</i>	0,392	0,364	0,395	0,0044	0,035	0,031
2	66 B	5	0,420	<i>0,463</i>	0,424	0,468	0,0036	0,043	0,044
2	66 C	10	0,365	0,434	0,372	0,439	0,0045	0,069	0,067
3	62 A	5	<i>0,440</i>	0,564	0,446	0,570	0,0056	0,124	0,124
3	62 B	5	0,514	<i>0,546</i>	0,520	0,551	0,0060	0,032	0,031
3	62 C	10	0,478	<i>0,592</i>	0,484	0,598	0,0054	0,114	0,114
1	124 A	5	0,319	0,352	0,323	0,357	0,0048	0,033	0,034
1	124 B	5	<i>0,284</i>	0,382	0,290	0,390	0,0050	0,098	0,100
1	124 C	10	0,312	<i>0,518</i>	0,316	0,524	0,0053	0,206	0,208

Die kursiv gesetzten Werte ergeben die Streuung zwischen den Versuchsgruppen.

Hartpapierplatten M.

Vergleich über den Einfluss der Nachwirkung bei der Messung I nach 10 s und II nach 60 s.
Anlieferungszustand. Temperatur 20° C, Kugel Φ 5 mm, 50 kg Belastung.

Tabelle Ic.

Dicke mm	Probe	Zahl Versuche	Eindrucktiefen		Nachwirkung		Differenz zwischen		
			Wert 10 s	Wert 60 s	mittel	Min. und Max. Wert			
			Min.	Max.	Min.	Max.	Δ 60 s und 10 s	10 s	60 s
1	4 A	5	<i>0,076</i>	<i>0,099</i>	0,077	0,100	0,0004	0,023	0,023
1	4 B	5	0,094	<i>0,099</i>	0,094	0,099	0,0002	0,005	0,005
1	4 C	10	0,082	0,098	0,082	0,099	0,0004	0,016	0,017
5	2 A	5	0,097	<i>0,123</i>	0,097	0,123	0,0002	0,026	0,026
5	2 B	5	<i>0,092</i>	0,116	0,092	0,116	0,0002	0,024	0,024
5	2 C	10	0,093	0,120	0,093	0,121	0,0002	0,027	0,028
1	3 A	5	0,086	0,098	0,086	0,098	—	0,012	0,012
1	3 B	5	0,084	<i>0,102</i>	0,084	0,104	0,0008	0,018	0,020
1	3 C	10	<i>0,072</i>	0,093	0,073	0,094	0,0004	0,021	0,021
5	1 A	5	0,118	0,138	0,118	0,139	0,0006	0,020	0,021
5	1 B	5	0,117	0,148	0,117	0,149	0,0008	0,031	0,032
5	1 C	10	0,099	0,125	0,100	0,126	0,0008	0,026	0,026

Die kursiv gesetzten Werte ergeben die Streuung zwischen den Versuchsgruppen.

Zusammenstellung

der Eindrücktiefen in % des rohen Mittelwertes für verschiedene Materialien. Anlieferungszustand.
Temperatur 20° C, Kugel Ø 5 mm, 50 kg Belastung. (S. Tab. Ia bis Ic.) Tabelle Id.

Material 1 mm dick	Mittelwert nach 60 s A	% Mat. Dicke	Mittelwert Nachwirkung v. 10 s - 60 s B	% Mat. Dicke	$\frac{B}{A} \cdot 100$
Hartpapierplatten 125 kg	0,089	8,9	0,00033	0,03	0,37 %
250 kg	0,088 4	8,8	0,00040	0,04	0,45 %
Presspan	0,290	29	0,00250	0,25	0,86 %
Transformatorenboard . . .	0,225	22,5	0,00250	0,25	1,10 %
					Nachwirk. % abs. Wert der Eindrücktiefe

mit 125 kg/cm² hergestellt worden sind. Transformatorenboard zeigte gegenüber Presspan eine geringere Streuung in den Einzelwerten und ganz allgemein eine etwas grössere Härte. Die Unterschiede waren jedoch nur gering, so dass ohne Bedenken im weiteren Verlaufe die Versuche mit Presspan zurückgestellt werden konnten.

Bei den Hartpapierrohren waren die Eindrücktiefen auf der äussern Seite stets etwas grösser als innen, was mit der Herstellungsart im Zusammenhange steht. Da sich sonst keine weiteren Unterschiede zeigten, wurden die Werte weggelassen, die an der Aussenseite gemessen worden sind.

Prüfapparate: Von den beiden oben beschriebenen und für alle Untersuchungen verwendeten Apparate ist die Kugeldruckpresse von Schopper weitaus besser geeignet als die Anordnung nach Martens. Der Kugeldruckprüfapparat Schopper ist für die verhältnismässig kleinen Drücke, die für die Härtebestimmung solcher Isolierstoffe in Betracht kommen, speziell gebaut und erlaubt ein rasches Arbeiten. Die Eindrücktiefe ist in $\frac{1}{1000}$ mm ablesbar. Die Presse kann ohne Schwierigkeiten für Kugeln oder Stempel als Druckkörper verwendet werden.

Die Anordnung nach Martens erfordert bei der Einstellung grosse Geschicklichkeit, da weiche Materialien schon kleine Eindrücke ergeben, wenn nur die Nullstellung einreguliert werden soll. Das Ablesen der Eindrücktiefe ist ebenfalls schwieriger, da die Presse für andere Härtebestimmungen gebaut ist.

Prüfdruck: Die Untersuchungen der verschiedenen Materialien wurden bei verschiedenen Drücken vorgenommen. Es konnten Gesamtdrücke von 12,5 bis 2000 kg in verschiedenen Stufen angewendet werden. Bei jeder Stufe wurden sowohl Kugeln von 2,5, 5 und 10 mm Durchmesser und Stempel von 5 und 9,5 mm Durchmesser verwendet. In Tabelle II sind die spezifischen Drücke zusammengestellt, die bei

Spezifische Drücke

in kg/cm² von Kugeln von 2,5, 5 und 10 mm Durchmesser bei Eindrücktiefen von 0,1, 0,2 und 0,3 mm und von Stempeln von 5 und 9,5 mm bei den meist angewendeten Totaldrücken. Tabelle II.

Drücke kg	Kugeln									Stempel	
	Durchmesser mm										
	2,5			5			10			5	9,5
	Eindrücktiefen mm										
	0,1	0,2	0,3	0,1	0,2	0,3	0,1	0,2	0,3	—	—
16,5	2190	1140	795	1072	550	373	533	268	181	79,5	22
62,5	8300	4350	3020	4060	2080	1415	2020	1090	685	319	88
187,5	24900	13000	9050	12260	6240	4240	6050	3050	2050	954	264
250	33200	17400	12050	16200	8320	5650	8100	4060	2730	1275	352

Der Einfluss der Bombierung bleibt unberücksichtigt.

den hauptsächlich angewendeten Totaldrücken vorkommen. Für die Kugeln wurden häufig gemessene Eindrücktiefen von 0,1, 0,2 und 0,3 mm angenommen, ohne die Randeinflüsse, bei Kugeln die Bombierung und bei Stempeln den Einfluss des Mit-Eindrückens der Randzone zu berücksichtigen. Aus dieser Zusammenstellung ist ersichtlich, wie mit abnehmendem Kugel- oder Stempeldurchmesser der spezifische Druck sehr stark ansteigt und bei geringen Eindrücktiefen bereits Werte annimmt, die für die geprüften Materialien unter Berücksichtigung ihrer Verwendung viel zu hoch sind.

Der spezifische Druck darf nicht so hoch sein, dass ein Durchdrücken (Aufpressen auf die Unterlage) des Materials befürchtet werden muss, was bei geringen Dicken verhältnismässig rasch auftreten kann. Bei grösseren Eindrücktiefen hat die um die eigentliche Eindruckstelle herumliegende Randzone, die sich elastisch mit durchbiegt, bereits einen wesentlichen Einfluss. Die Eindrücktiefen dürfen aber andererseits nicht zu gering gewählt werden, da mit der Abnahme der gefundenen Werte der durch den Apparat bedingte Messfehler prozentual stark ansteigt, ebenso wie die Ungenauigkeiten, die als Folge der groben Struktur der Materialoberfläche anzusehen sind.

Die hier untersuchten Isoliermaterialien vertragen ohne Nachteil ein Zusammendrücken um 10 bis 20 % ihrer Dicke. Die Untersuchungen mit den kleinen Kugeln, also bei hohen spezifischen Drücken, ergaben aber bereits Eindrücke, die eine Zertrümmerung des Materials, vor allem bei Hartpapierplatten zur Folge hat.

Bei der praktischen Verwendung werden die vorliegenden Isoliermaterialien dauernd Drücken bis zu ungefähr 25 kg/cm² ausgesetzt. Grössere Drücke kommen praktisch selten vor und sind dann gewöhnlich nicht von Dauer. Ein spezifischer Druck, der das 10- bis 20fache der in der Praxis angewendeten Werte erreicht, im vorliegenden Falle also 250 bis 500 kg/cm² betragen würde, wird nach unserer Auffassung für die praktische Verwendung bereits gute Aufschlüsse ergeben. Die kursiv gesetzten Zahlen der Tabelle II liegen in dem erwähnten Bereiche. Diese spezifischen Drücke sind mit allen durchgeprüften Kugeln und Stempeln leicht herstellbar und sie können für die Prüfung als normal vorgeschlagen werden. Eine Nachprüfung der Tabellen Ia bis Id, sowie IIIa bis III d zeigt, dass bei spezifischen

Hartpapierrohre M (Innenseite).

Verhältnis von elastischer und dauernder Verformung. 8 Tage rel. Feuchtigkeit 65%. Tabelle IIIa.

Materialdicke mm	Druck kg	Fläche mm	Verformung		%	dauernde Verformung % Materialdicke
			elastisch mm	dauernd mm		
		Stempel	nach 6 min	nach 60 s		
3	15,6	5	0,050	0		
3	62,5	5	0,114	0,0026	(2,3)	1
3	187,5	5	0,308	0,0440	14,3	1,47
3	250	5	0,495	0,0966	19,5	3,22
		Kugel	nach 2 min	nach 30 s		
3	15,6	10	0,091	0—0,002		
3	63,5	10	0,274	0,043	15,7	1,8
3	187,5	10	0,597	0,176	29,5	5,9
3	250	10	0,737	0,229	31,0	7,6
		Kugel	nach 2 min	nach 30 s		
3	15,6	5	0,0904	0,0026	(2,85)	
3	62,5	5	0,362	0,096	26,5	3,2
3	187,5	5	0,735	0,323	44,0	10,8
3	250	5	0,906	0,433	47,8	14,4
		Kugel	nach 2 min	nach 30 s		
3	15,6	2,5	0,122	0,011	(9)	
3	62,5	2,5	0,474	0,220	46,5	

187,5 u. 250 kg nicht ausführbar

*Hartpapierrohre M (Innenseite).*Verhältnis von elastischer und dauernder Verformung. 8 Tage rel. Feuchtigkeit 65⁰/₀.

Tabelle III b.

Materialdicke mm	Druck kg	Fläche mm	Verformung		%	dauernde Verformung ⁰ / ₀ Materialdicke
			elastisch nach 2 min mm	dauernd nach 30 s mm		
		Stempel				
20	15,6	5	0,060	0,0072	12	
20	62,5	5	0,226	0,039	17,3	
20	187,5	5	0,652	0,1826	28,0	
20	250	5	0,863	0,271	31,3	1,35
		Kugel				
20	15,6	10	0,117	0,007	(6)	0,7
20	62,5	10	0,448	0,139	31,0	
20	187,5	10	1,011	0,390	38,7	2,0
20	250	10	1,218	0,487	40,0	2,44
		Kugel				
20	15,6	5	0,141	0,009	(6,4)	
20	62,5	5	0,559	0,195	35,0	
20	187,5	5	1,330	0,689	51,8	
20	250	5	1,610	0,916	57,0	4,58
		Kugel				
20	15,6	2,5	0,161	0,121	13	
20	62,5	2,5	0,729	0,360	49,5	
	187,5 } 250 }	nicht durchführbar				

*Hartpapierrohre M (Innenseite).*Verhältnis von elastischer und dauernder Verformung. 8 Tage rel. Feuchtigkeit 100⁰/₀.

Tabelle III c.

Materialdicke mm	Druck kg	Fläche mm	Verformung		%	dauernde Verformung ⁰ / ₀ Materialdicke
			elastisch nach 2 min mm	dauernd nach 30 s mm		
		Stempel				
20	16,5	5	0,078	0,0056	(7,3)	
20	62,5	5	0,357	0,124	34,8	
20	187,5	5	0,973	0,411	42,2	
20	250	5	1,294	0,605	50,7	3,27
		Kugel				
20	16,5	10	0,244	0,118	48,2	
20	62,5	10	0,626	0,250	40,0	
20	187,5	10	1,241	0,279	46,6	
20	250	10	1,464	0,679	46,5	3,22
		Kugel				
20	16,5	5	0,294	0,131	44,4	
20	62,5	5	0,814	0,431	53,0	
20	187,5	5	1,562	0,901	57,8	
20	250	5	1,652	1,006	61,0	5,00
		Kugel				
20	16,5	2,5	0,290	0,120	41,5	
20	62,5	2,5	1,123	0,679	60,4	
	187,5 } 250 }	nicht ausführbar				

Hartpapierrohre M (Innenseite).

Verhältnis von elastischer und dauernder Verformung. Getrocknet 72 h bei 105° C.

Tabelle III d.

Materialdicke mm	Druck kg	Fläche mm	Verformung		‰	dauernde Verformung ‰ Materialdicke
			elastisch nach 2 min mm	dauernd nach 30 s mm		
Stempel						
20	16,5	5	0,051			
20	62,5	5	0,1844	0,010	(5,5)	
20	187,5	5	0,513	0,07	13,6	
20	250	5	0,693	0,133	19,2	0,66
Kugel						
20	16,5	10	0,083	0,0036	(4,3)	
20	62,5	10	0,361	0,069	19,1	0,35
20	187,5	10	0,827	0,252	30,5	1,26
20	250	10	1,000	0,329	32,9	1,65
Kugel						
20	16,5	5	0,111	0,044	(3,96)	
20	62,5	5	0,453	0,107	23,7	0,54
20	187,5	5	1,025	0,449	43,7	2,25
20	250	5	1,268	0,584	46,1	2,91
Kugel						
20	16,5	2,5	0,157	0,023	14,7	
20	62,5	2,5	0,596	0,258	43,4	1,29
20	187,5	} nicht ausführbar				
20	250	} nicht ausführbar				

Drücken von 250 bis 500 kg/cm² Eindringtiefen vorkommen, welche der oben gestellten Bedingung betreffend das Verhältnis der Zusammendrückbarkeit zur Dicke des Prüflings entsprechen.

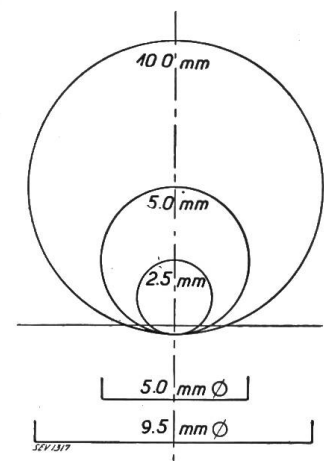
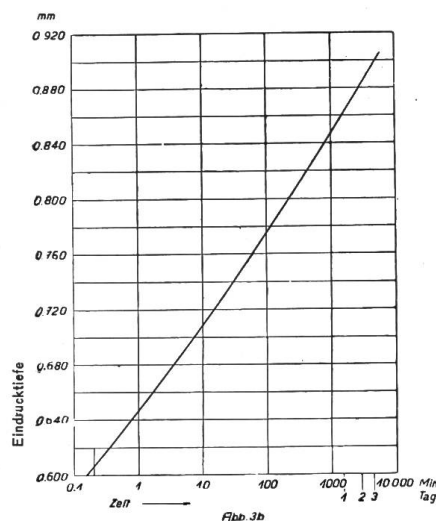
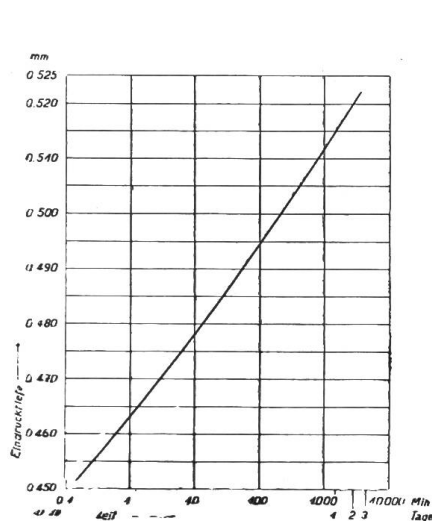


Fig. 5. Dauerversuche.

Fig. 5a.
Hartpapierplatte 20 mm.
Angeliefert. 20° C. Belastung
250 kg. Kugel 10 kg.

Fig. 5b.
Pressspan 10 mm.
Angeliefert. 20° C. Belastung
250 kg. Stempel 9,5 mm.

Fig. 6.
Vergleich von Kugel mit Stempel.
Kugeln 2,5–5,0–10,0 mm Ø
Stempel 5,0– 9,5 mm Ø
Für die Eindringtiefe 0,3 mm ist
Kalotten-Ø der 10 mm Kugel =
2×Kalotten-Ø der 2,5 mm Kugel

Prüfdauer: Aus den verschiedenen im weiteren Zusammenhange noch erwähnten graphischen Darstellungen und unter Berücksichtigung der unter den Vorproben bereits erwähnten Formel $y = a \cdot \log x + b$ ergibt sich die Forderung für die Dauer

der Prüfung, dass diese eine bestimmte Mindestzeit nicht unterschreiten darf. Das Interesse an einer raschen Prüfung, die auch erlaubt, eine möglichst grosse Zahl Einzelwerte zu erhalten, verlangt aber andererseits eine nicht zu grosse Ausdehnung der Belastungsdauer.

Für jede Materialart sollten mindestens 6 Einzelwerte gemessen werden. Die minimale Belastungsdauer soll nach unseren Erfahrungen eine Minute betragen. Unter diesen Bedingungen ist der gemessene Wert für die Eindringtiefe 90% des wirklichen Wertes bei Hartpapier und 70 bis 75 % bei Presspan (Fig. 5a und b).

Druckkörper (Kugel oder Stempel): Im Verlaufe der Untersuchungen hat sich ergeben, dass bei grossen Totaldrücken die Kugel von 2,5 mm Durchmesser bis zur Fassung eindringt und der Prüfapparat daher nicht voll ausgenützt werden kann. Dieser Durchmesser wird daher bei den weiteren Untersuchungen ausgeschlossen.

Die schematische Skizze (Fig. 6) zeigt Kugeln und Stempel in entsprechender Vergrösserung. Es ist die Kugelcalotte eingezeichnet, welche bei 0,3 mm Eindringtiefe im Material auftritt. Aus der Darstellung ist deutlich die Keilwirkung der kleinen Kugel bei grösseren Eindringtiefen als 0,3 mm ersichtlich. Ein elastisches Material schmiegt sich einer grösseren Kugel besser an. Massgebend für ein Material ist nicht nur die bei einem bestimmten Druck erreichte Eindringtiefe t , sondern vor allem das eingedrückte Volumen V , das sich zur Eindringtiefe wie folgt verhält:

$$V_{\text{Kugel}} = \pi t^2 \left(r - \frac{t}{3} \right) \text{ oder } \pi r t^2 - \frac{\pi}{3} t^3$$

$$V_{\text{Stempel}} = \pi r^2 t.$$

Da wir annehmen dürfen, dass der Totaldruck dem eingedrückten Volumen direkt proportional ist, so steht er auch in linearer Beziehung mit der Eindringtiefe eines Stempels. Bei Verwendung von Kugeln und grösseren Eindringtiefen entsteht für den Ausdruck $\frac{\pi t^3}{3}$ ein wesentlicher Wert, der nicht vernachlässigt werden darf und die Verhältnisse sind dann komplizierter.

Aus diesen Tatsachen ergeben sich für die Beurteilung der Härteprüfung unter den vorliegend geschilderten Verhältnissen folgende *Leitsätze*:

1. Bei der Anwendung von Stempeln als Druckkörper sind die verschiedenen gemessenen Eindringtiefen für jede Stempelgrösse unter sich vergleichbar, wenn es sich nicht um Materialien von zu grosser Härte und Elastizität handelt, da in diesem Falle der Einfluss der Randzonen beträchtlich ist und nicht vernachlässigt werden darf. Daraus ergibt sich, dass die Stempelprobe bei weichen, wenig elastischen Materialien, wie Transformatorenboard und Presspan viel geeigneter ist als für Hartpapier, welches eine glatte, glasartige Oberfläche hat und bei dem um die Randzone des Eindruckes herum eine mehr oder weniger grosse Fläche elastisch mitgepresst wird.

2. Bei Verwendung von Kugeln ist eine Umrechnung auf Brinellhärte oder auf das eingedrückte Volumen zu empfehlen, da die so erhaltenen Werte einen besseren Vergleich ermöglichen.

3. Je kleiner die Kugel (r), desto kleiner muss auch die Eindringtiefe (t) gewählt werden. Es soll dabei ungefähr folgender Ansatz berücksichtigt werden:

$$r \geq 10 t.$$

Bei Hartpapier kann diese Bedingung verhältnismässig leicht erfüllt werden, wenn die weiter oben angegebenen spezifischen Drücke angewendet werden. Bei Transformatorenboard und Presspan werden die Eindringtiefen gewöhnlich zu gross.

4. Die Prüfergebnisse der Untersuchungen, die mit Stempel durchgeführt worden sind, können nicht ohne weiteres verglichen werden mit denjenigen, die mit Kugeln erhalten werden. Die Prüfergebnisse sind also nur unter sich vergleichbar.

5. Aus der Tabelle der spezifischen Drücke geht hervor, dass diese für die gebräuchlichen Stempelarten kleiner sind als für die gebräuchlichen Kugeln, wenn die gleichen Totalbelastungen angewendet werden.

Aus diesen Ueberlegungen möchten wir vorschlagen, für die Härtebestimmung von Hartpapierprodukten als Druckkörper Kugeln zu verwenden und für die weichen Stoffe, wie Transformatorenboard und Pressspan mit Stempeln von nicht zu kleinem Durchmesser zu arbeiten.

In den vorliegenden Untersuchungen wurden Stempeldurchmesser von 5 und 9,5 mm gewählt, letztere im Anschluss an die erwähnten Untersuchungen von Meyer. Wir möchten jedoch vorschlagen, einen Stempel von kreisförmigem Querschnitt und 1 cm² Oberfläche zu verwenden, da dann die Gesamtbelastung gleich ist dem spezifischen Druck.

Für die Kugeldruckprobe eignet sich eine Kugel mit 10 mm Durchmesser am besten, da kleinere Kugeln bald zu grosse spezifische Drücke ergeben und, wie schon bemerkt, eine Art Keilwirkung ausüben. Aus der Tabelle für die spezifischen Drücke ist zu entnehmen, dass der zulässige Totaldruck bei diesen Bedingungen zwischen 15 und 75 kg liegen soll. Bei der Verwendung der Kugeldruckpresse von Schopper würde das den Belastungsstufen 16,5 kg und 62,5 kg entsprechen.

Prüfzustand: In den Tabellen IIIa bis III d und den Fig. 7 und 8 über Untersuchungen an Hartpapierplatten, Hartpapierrohren und Transformatorenboard wurden die Einflüsse von Wärme und Feuchtigkeit auf die Härte dieser Materialien zusammengestellt. Einwandfrei ist eine Zunahme der elastischen und der dauernden Eindrucktiefen bei höherer Temperatur, in unserem Falle bei 90°C gegenüber Zimmertemperatur, festzustellen, ebenso wie der Einfluss der Feuchtigkeit der Luft.

Die gefundenen Zahlen bei den verschiedenen Prüfzuständen zeigen deutlich, wie durch Wärme oder Feuchtigkeit die dauernde Verformung relativ und absolut grösser wird; die Materialien sind bei diesen Bedingungen weniger spröde und plastischer. Gleichzeitige Anwendung von Feuchtigkeit und Wärme würde diese Erscheinung noch ausgeprägter herbeiführen.

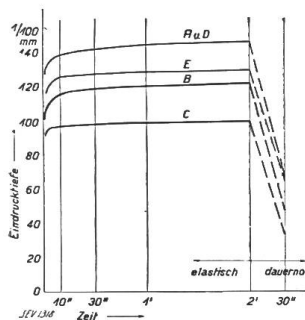


Fig. 7.

Elastische und dauernde Verformung. Hartpapierrohren. 10 mm Kugel. Belastung 250 kg. Innenwerte.

- A 8 Tage bei 100% rel. Feuchtigkeit gelagert.
 B 8 Tage bei 65% rel. Feuchtigkeit gelagert.
 C 72 Stunden getrocknet bei 105°C.

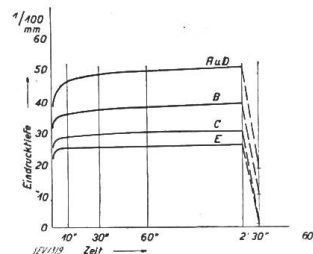


Fig. 8.

Elastische und dauernde Verformung. Transformatorenboard 3 mm. Stempel 9,5 mm. Belastung 187,5 kg.

- D Erwärmung auf 90°C während 1 Stunde.
 E Anlieferungszustand.

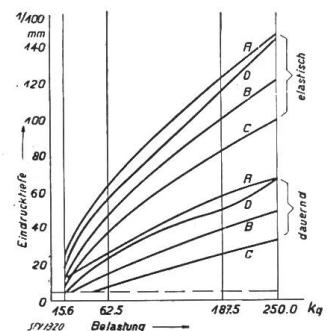


Fig. 9.

Eindrucktiefe in Funktion der Prüfbelastung bei verschiedenen Prüfzuständen. Hartpapierrohren. Dicke 20 mm. Kugel 10 mm. Innenwerte.

Die Geschwindigkeit, mit der ein Endwert für die Eindrucktiefe erreicht wird, ist bei trockenem Material am grössten, ebenso das Verhältnis zwischen elastischer und plastischer Verformung. Ein ausgesprochenes Verhalten bei einem der Prüfzustände konnte jedoch nicht festgestellt werden. Da die Dauer einer einzelnen Prüfung in Abhängigkeit des Einflusses der Zeit einige Minuten beträgt, so soll das zu prüfende Material vor Beginn der Prüfung während acht Tagen bei 65% relativer Luftfeuchtigkeit gelagert werden. Dadurch wird ermöglicht, das Material in einen möglichst stabilen Prüfzustand zu versetzen, wodurch jede Anwendung spezieller Vorsichtsmassregeln während der Prüfung überflüssig wird.

Elastische und bleibende Verformung: Um das Verhältnis der bleibenden zur elastischen Verformung bei der Härteprüfung festzustellen, wurden verschiedene

dementsprechende Prüfungen bei einer Belastungszeit von einer Minute durchgeführt. Aus diesem Verhältnis lassen sich sehr interessante Schlüsse ziehen über die elastischen Eigenschaften des vorliegenden Materials. Aus den Fig. 7, 8 und 9 ist ersichtlich, dass, wie bereits betont, durch die Aufnahme von Feuchtigkeit die Materialien, sowohl Hartpapier als Transformatorboard, grössere bleibende Deformationen ergeben, d. h. also plastischer, biegsamer und formbarer werden. Eine ähnliche Wirkung übt auch, wie bereits bemerkt, die höhere Temperatur aus.

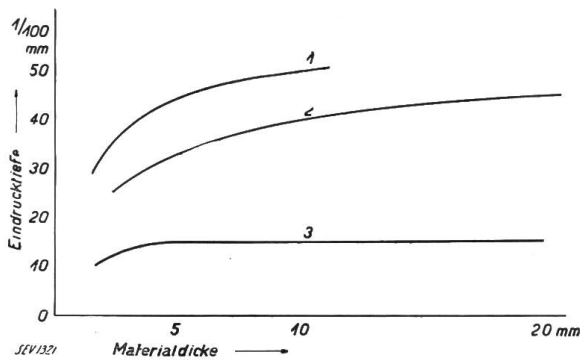
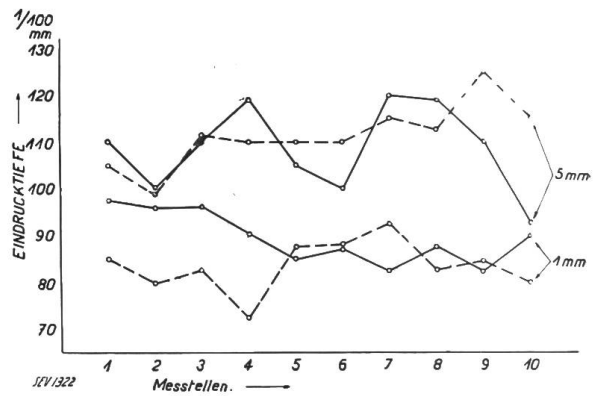


Fig. 10.

- Abhängigkeit der Eindrucktiefe von der Materialdicke.
 1 Transformatorboard. Stempel 9,5 mm. Belastung 187,5 kg
 2 Hartpapierrohre. Kugel 10 mm. Belastung 62,5 kg
 3 Hartpapierplatten. Kugel 10 mm. Belastung 62,5 kg



11.

Streuung der Eindrucktiefe auf den Probestücken.
 Hartpapierplatten. 125 Atm. Angeliefert. 20° C. Kugel 5 mm.
 Belastung 50 kg.

Einfluss verschiedener Materialdicken: In Fig. 10 sind die elastischen Eindrucktiefen bei verschiedenen Materialdicken und bestimmten Belastungen aufgezeichnet. Es geht daraus hervor, dass die Eindrucktiefe mit der Dicke zunimmt, die Härte also abnimmt. Mit dieser Abnahme der Härte im Zusammenhang steht auch das niedrigere spezifische Gewicht bei zunehmender Dicke. Diese Erscheinung steht im Zusammenhang mit der Herstellungsart. Beim Zusammenpressen werden beim Hartpapier die äussersten Schichten am weitesten kondensiert und sind dem-

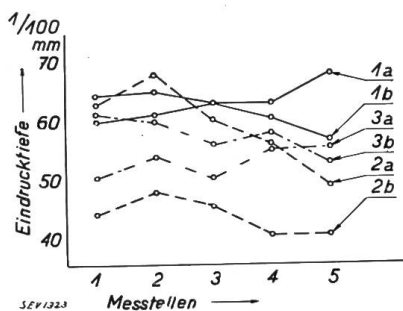


Fig. 12.

- Streuung der Eindrucktiefe an den Probestücken.
 1 a aussen > 20 mm
 1 b innen > 20 mm
 2 a aussen > 5 mm
 2 b innen > 5 mm
 3 a aussen > 3 mm
 3 b innen > 3 mm
 Kugel 5 mm. Angeliefert.
 20°C. Belastung 62,5 kg.

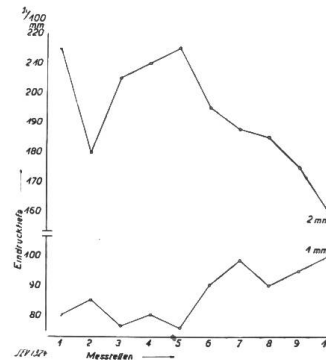


Fig. 13.

Streuung der Einzelwerte auf den Probestücken.
 Transformatorboard. Angeliefert. 20° C. Stempel
 9,5 mm. Belastung 250 kg.

sprechend am härtesten. Die inneren Schichten bleiben infolge ungenügender Durchwärmung entsprechend zurück. Eine ähnliche Feststellung ist auch seinerzeit von Meyer gemacht worden. Wenn Prüfvorschriften ausgearbeitet werden sollen, dann muss auf diesen Punkt Rücksicht genommen werden. Man wird am besten so vorgehen, dass man eine Kurvenschar für die normalen und minimalen Werte, ähnlich denjenigen in Fig. 10 aufstellt, um den Einfluss der Materialdicke bei gegebenen Materialien möglichst einwandfrei feststellen zu können.

Einflüsse der Herstellungsweise: Meyer hat in seiner mehrfach erwähnten Arbeit festgestellt, dass die Härte bei gepressten und geschichteten Materialien beträchtliche Streuungen über die ganze untersuchte Oberfläche aufweist. Um einen Vergleich mit diesen Ergebnissen zu bekommen, wurde auch von uns die Streuung der Einzelwerte über die Oberfläche des Prüfgegenstandes festgestellt. Solche Werte sind bereits in den Tabellen Ia bis Id zusammengestellt. Es zeigt sich, dass ziemlich starke Streuungen in den einzelnen Werten auftreten. Um diesen Methodenfehler, der mit der Struktur und dem Gefüge des untersuchten Materials im Zusammenhang steht, nach Möglichkeit auszumerzen, wurde daher die Forderung gestellt, mindestens 6 Werte bei jeder Prüfung zu bestimmen. Die Fig. 11, 12 und 13 zeigen die Streuungen der einzelnen Werte auf dem Prüfstück. Es wurden eine grosse Anzahl von Prüfungen verglichen, ohne dass es möglich war, irgendwelche Gesetzmässigkeiten, die allein auf die Herstellungsart zurückzuführen wären, feststellen zu können. Es scheint also, dass der Einfluss des Gefüges dieser faserigen Isolierstoffe wesentlich grösser ist als der Einfluss der Herstellungsart auf die Streuung der Einzelwerte für die Härte solcher Stoffe.

Zusammenfassung und Vorschläge für Richtlinien und Prüfmethoden.

Auf Grund der vorliegenden Untersuchungen ergibt sich, dass der Härteprüfung von geschichtetem und presspanähnlichen Isolierstoffen unbedingt eine Bedeutung für eventuelle Prüfvorschriften zukommt.

Als Prüfgerät wird die Kugeldruckpresse von Schopper mit den Belastungsstufen 250 kg, 187,5; 62,5 und 15,63 kg empfohlen.

Die Härteprüfung an Hartpapierprodukten soll mit Hilfe einer Kugel von 10 mm Durchmesser durchgeführt werden. Um die entsprechende spezifische Belastung zu erhalten, ist der anzuwendende Totaldruck zwischen 15 und 75 kg zu wählen, was bei der erwähnten Prüfeinrichtung durch die beiden Belastungsstufen 16,5 und 62,5 kg sehr gut erreicht werden kann.

Für die weicheren Stoffe, wie Transformatorenboard und Presspan, soll als Druckkörper ein Stempel von kreisförmigem Querschnitt und 1 cm² Druckfläche verwendet werden, wobei dann der Totaldruck gleich dem spezifischen Druck wird.

Die Prüfdauer muss mindestens eine Minute betragen. Wenn solche Isolierstoffe eingehender geprüft werden sollen, dann ist es empfehlenswert, verschiedene Prüfzustände, bedingt durch z. B. hohe Luftfeuchtigkeit, erhöhte Prüftemperatur und ähnliches, anzuwenden, um die Beständigkeit der Materialien gegen die verschiedenen Einflüsse zu erfassen. Für die laufende Prüfung soll das Prüfstück vor der Prüfung acht Tage bei Zimmertemperatur und 65 % relativer Luftfeuchtigkeit gelagert werden.

Die für die vorliegende Untersuchung verwendeten Materialien wurden bereitwilligst von den folgenden Firmen zur Verfügung gestellt:

Schweiz. Isolawerke, Breitenbach,
Micafil A.-G., Altstetten und
H. Weidmann A.-G., Rapperswil,

denen auch an dieser Stelle der beste Dank ausgesprochen sei.

Die Untersuchungen wurden im Laboratorium der A.-G. Brown, Boveri & Cie., Baden, durchgeführt, der wir ebenfalls für die Ausführung der Versuche zu danken haben.