

Zeitschrift: Bulletin de l'Association suisse des électriciens
Herausgeber: Association suisse des électriciens
Band: 42 (1951)
Heft: 10

Artikel: Über die Festigkeit von Elektroporzellan
Autor: Neubauer, F.
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-1056861>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. 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. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

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. [Voir Informations légales.](#)

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. [See Legal notice.](#)

Download PDF: 18.01.2025

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

Scherer, S. W.: High-Frequency Heating. Commun. News Bd. 9(1947), Nr. 2, S. 45...55.
 Schmitt, P.: Der kernlose Mittelfrequenzofen. Elektr.-Verwert. Bd. 21(1947), Nr. 11/12, S. 252...257.
 Sluifers, A. van: Grundlagen der Hochfrequenzheizung. Elektr.-Verwert. Bd. 21(1947), Nr. 11/12, S. 209...219.
 Stäger, H.: Härtung von Kunststoffen im Hochfrequenzfeld. Brown Boveri Mitt". Bd. 34(1947), Nr. 6/7, S. 129...138.
 Turney, A.: Radio Interference from Industrial R. F. Heating Equipment. Electron. Engng. Bd. —(1947), Aug.
 Whitehead, J. B.: Dielectric Heating. The Measurement of Loss under Rising Temperature. Trans". AIEE Bd. 66(1947), S. 947...949.
 Whitehead, J. B.: Dielectric Losses with High Frequencies. Electr. Engng. Bd. 66(1947), Sept., S. 907...910.

Willcox, T. N.: Cost Analysis of Dielectric Preheating. Mod. Plast. Bd. 24(1947), Nr. 7, S. 131...135.
 Red.: High-Frequency Heating. Gen. Electr. Rev. Bd. 50 (1947), Jan., S. 25...26.
 Red.: Interference Problems Arising from Industrial Electronic and Electromedical Apparatus. J. Instr. Electr. Engrg., Part III, Bd. 94(1947), Nr. 27, S. 57...58.
 Red.: Multiple-Position Coils Speeds Induction Heating. Amer. Machinist Bd. 91(1947), Nr. 22, S. 90...93.
 Weitere Literaturzusammenstellungen siehe auch: Elektrizitätsverwertung Bd. 21(1946/47), Nr. 11/12, S. 259...260; Electronic Engineering Bd. —(1945), Aug., S. 629...630.

Adresse des Autors:

G. Lang, Dipl. Ing., Hauptgasse 33, Olten (SO).

Über die Festigkeit von Elektroporzellan

Von F. Neubauer, Laufen

621.315.612.2

Ausgehend von der Entwicklung der Hochspannungsfreileitungsisolatoren in den letzten Jahrzehnten werden die Eigenschaften des Porzellans in Abhängigkeit von seiner Zusammensetzung besprochen. In einer Tabelle werden die wichtigsten Eigenschaften des Porzellans angegeben und die wichtigsten Prüfkörper beschrieben. Es wird der Einfluss der Glasur und der «Brennhaut» sowie der Oberflächenbehandlung auf die mechanische Festigkeit erörtert und das Altern des Porzellans besprochen. Abschliessend wird die Abhängigkeit der Zug- und Biegefestigkeit vom Querschnitt gezeigt.

Après avoir rappelé l'évolution des isolateurs pour lignes aériennes à haute tension durant ces dernières décennies, l'auteur s'occupe des propriétés physiques de la porcelaine, qui diffèrent selon la composition de cette matière, et décrit les pièces à vérifier les plus importantes. La glaçure et la pellicule de cuisson, ainsi que le traitement de la surface, exercent une certaine influence sur la résistance mécanique. L'auteur discute également du vieillissement de la porcelaine, puis il montre que la résistance à la traction et à la flexion dépend de la section.

Die zeitweise stürmische Entwicklung der Elektrotechnik in den letzten 60 Jahren hat auch auf das Elektroporzellan, das heute der wichtigste Isolierstoff im Freileitungsbau ist, einen grossen Einfluss ausgeübt. Durch Zusammenarbeit von Keramikern und Elektrotechnikern gelang es, das für Hochspannungszwecke benötigte Hartporzellan so zu verbessern, dass heute die Isolierung der Freileitungen von z. B. 110 oder 220 kV keine Schwierigkeiten mehr macht, während um die Jahrhundertwende die Isolation von Spannungen über 20 kV schon ein heikles Problem bildete. Zweifelsohne ist die genaue Kenntnis der Eigenschaften des Hart- oder Hochbrandporzellans, das auf dem europäischen Kontinent fast ausschliesslich verwendet wird, für den Konstrukteur elektrischer Anlagen sehr wichtig.

Von einem guten Hochspannungsporzellan verlangt man eine genügende elektrische Festigkeit, die einen vollkommen dichten, nicht hygroskopischen Scherben voraussetzt und eine hinreichende mechanische und thermische Festigkeit. Die mechanische Festigkeit tritt gerade durch die Entwicklung der für Hoch- und Höchstspannungen verwendeten Freileitungsisolatoren in den Vordergrund, die seinerzeit von den Stützisolatoren für mittelhohe Spannungen (Delta-, Weitschirm- und Beznautyp) ihren Ausgang nahm und vor etwa 40 Jahren durch die weitere Erhöhung der Spannung zu den Hängeisolatoren mit Unterteilung der Isolation auf mehrere Glieder führte.

In den USA wurde zu Beginn des Jahrhunderts als erster Hängeisolator ein Schlingenisolator konstruiert, der nach seinem Erfinder *Hewlett-Isolator* genannt wurde und auch bei uns Eingang fand. Die zweite Etappe der Hängeisolatoren in Europa brachten dann die sog. *Kappenklöppelisolatoren*, bei denen das Porzellan hauptsächlich auf Scherung und Druck beansprucht wird. Die verschiedenen Ty-

pen unterscheiden sich lediglich durch die Art der Klöppelbefestigung, und sind als Kugelkopf-, Kegelform-, Federringisolator und Ohio-Brass-Typ bekannt geworden. Bei der dritten Gattung der Hängeisolatoren, den *Vollkern-*, nach der Motor Columbus A.-G., Baden, auch *Motorisolatoren* genannt, wird ebenso wie bei deren Weiterentwicklung, den seit 10 Jahren in Betrieb befindlichen *Langstabisolatoren* das Porzellan auf Zug beansprucht (Fig. 1). Die systematische Entwicklung des Por-

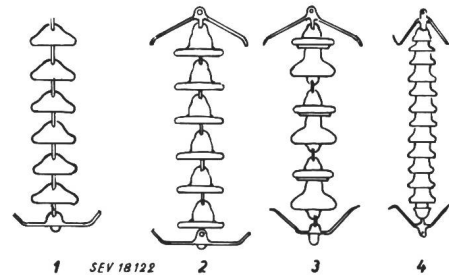


Fig. 1

Entwicklung der Freileitungs-Hängeisolatoren

1 Hewlett-Isolator; 2 Kappeninsolator; 3 Vollkerninsolator;
 4 Motor-Langstabinsolator

Der Metallanteil verglichen mit dem Totalgewicht des Isolators ist bei Kappenisolatoren 49 %, bei Motorisolatoren 35,5 %, bei Stabisolatoren 28 %

zellans hat zu Zerreisswerten geführt, die früher als unmöglich galten. So beträgt die mittlere Bruchfestigkeit z. B. von Motorisolatoren des Typs VK-4 bei einem Strunkdurchmesser von 75 mm rund 10 000 kg.

Die *Eigenschaften* des Porzellans hängen, wie das bekannte in Fig. 2 dargestellte Diagramm zeigt, von seiner Zusammensetzung ab. Durch Änderung der Zusammensetzung können entweder mittlere elektrische und mechanische Eigenschaften erreicht oder aber eine besonders gewünschte Eigenschaft auf Kosten der anderen entwickelt werden.

In den Porzellanfabriken verfährt man so, dass man mit mehreren Massen arbeitet und für die Herstellung von Isolatoren diejenige Masse verwendet, welche für die Beanspruchung in der Praxis die günstigsten Eigenschaften aufweist.

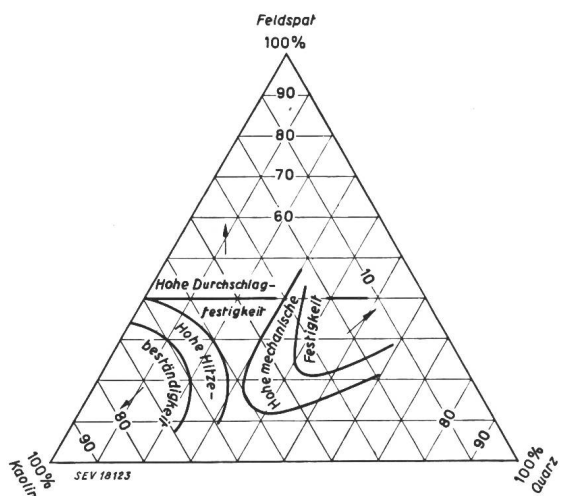


Fig. 2
Eigenschaften des Porzellans in Abhängigkeit von der Zusammensetzung

Der Motorisolator ist infolge seiner Bauart praktisch nicht durchschlagbar, so dass der Keramiker in diesem Fall auf die Entwicklung sehr guter mechanischer Eigenschaften des Porzellans sich einstellen kann. Dagegen ist beim durchschlagbaren Kappenisolator ein Werkstoff von hoher elektrischer Durchschlagfestigkeit und von hoher mechanischer Festigkeit nötig. Hierin liegt auch ein gewisser Nachteil bzw. eine gewisse Schwierigkeit in der Anfertigung von Kappenisolatoren gegenüber den Vollkernisolatoren begründet. Die Praxis scheint immer mehr für den Motorisolator, der nun seit etwa 30 Jahren seine Betriebstüchtigkeit bewiesen hat, sich zu entscheiden.

Tabelle I gibt eine Übersicht über die wichtigsten Eigenschaften des Hartporzellans¹⁾. Die aufgeführten Werte beziehen sich auf Hartporzellan, das im Dreh-, Giess- oder Strangpressverfahren verformt wurde. Für die im Nass- oder Halbnassverfahren in Stahlmatrizen gepressten Isolierteile für Niederspannungsanlagen gelten die angegebenen Werte selbstverständlich nicht. Zu den Werten in Tabelle I ist laut DIN 40685 zu bemerken, dass

«... alle Zahlenwerte an besonders hergestellten, den Prüfvorschriften genau entsprechenden Prüfkörpern ermittelt worden sind. Soweit nicht anders angegeben, gelten die Zahlen bei Raumtemperatur. Die Angaben können nicht ohne weiteres auf Prüfkörper und Fertigstücke anderer Form und Grösse übertragen werden. Die angegebenen Zahlenwerte sind Mittelwerte gemäss den Prüfbedingungen DIN 57335 (VDE 0335) – Leitsätze für die Prüfung keramischer Isolierstoffe.»

Die interessantesten Prüfkörper seien im folgenden kurz beschrieben:

Die für die Bestimmung der Zugfestigkeit verwendeten Prüflinge sind längliche Achterkörper von 76 mm Länge mit abgeplatteten Enden und

20 mm Durchmesser an der Einschnürstelle. Der grösste Durchmesser an den Enden soll 40 mm betragen (Fig. 3). Als Prüfkörper für die Druckfestigkeit sind Zylinder von 25 mm Durchmesser und 25 mm Höhe vorgeschrieben, deren Endflächen

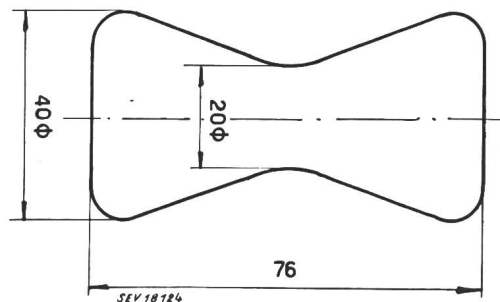


Fig. 3
Porzellan-Prüfkörper zur Bestimmung der Zugfestigkeit

planparallel geschliffen sind. Für die Bestimmung der Biegefestigkeit nimmt man Stäbe von 120 mm Länge und 10 mm Durchmesser. Die Stäbe gleicher Abmessungen werden auch für die Bestimmung der Schlagbiegefestigkeit benutzt. Zur Prüfung auf Temperaturwechselbeständigkeit dienen Vollzylinder von 25 mm Durchmesser und 25 mm Höhe. Zur Bestimmung der elektrischen Durchschlagfestigkeit sind unglasierte, ebene Platten von 80 mm Durchmesser und 8...10 mm Stärke mit einer einseitigen kalottenartigen Vertiefung zu verwenden (Fig. 4). Die Vertiefung und die parallelen Flächen sind zu metallisieren oder zu graphitieren.

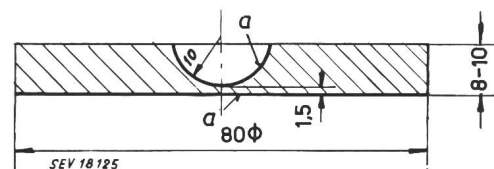


Fig. 4
Porzellan-Prüfkörper zur Bestimmung der Durchschlagfestigkeit a leitender Belag

In Tabelle I sind für glasiertes und unglasiertes Porzellan keine verschiedenen elektrischen Werte angegeben, was darauf zurückzuführen ist, dass die Glasur auf die elektrischen Eigenschaften keinen Einfluss hat. Dagegen liegen die mechanischen Festigkeitswerte des glasierten Porzellans höher als die des unglasierten. Das Glasieren der Isolatoren bezweckt also nicht allein die Herstellung einer glatten Oberfläche, die das Sauberhalten im Betrieb erleichtert. Auf diesen Umstand haben unter anderen Gerold [1]²⁾ und Handrek [2] hingewiesen. Der Verfasser ist in einer früheren Arbeit [3] zu dem gleichen Resultat gekommen, dass nämlich durch eine «passende» Glasur die mechanischen Eigenschaften des Porzellans günstig beeinflusst werden. Auf das Zusammenpassen von Glasur und Scherben hat die Spannung, die zwischen Scherben und aufgeschmolzener Glasur besteht, den grössten Einfluss. Diese Spannung ist abhängig von der che-

¹⁾ aus DIN 40685/V. 50.

²⁾ siehe Literatur am Schluss.

mischen Zusammensetzung der Glasur und der gebildeten Zwischenschicht zwischen Scherben und Glasur, die wiederum von der Brennhöhe, der Brenndauer und der Glasurdicke beeinflusst wird. Die Festigkeitserhöhung durch die Glasur kann bei den Prüfkörpern bis zu 50 % betragen. In gleicher Weise wirkt eine schlechte Glasur aber festigkeitsvermindernd. Was über den Einfluss der Glasur auf die mechanische Festigkeit gesagt wird, gilt auch für die Temperaturwechsel-Beständigkeit des Porzellans. Auch da sehen wir die günstige Wirkung einer guten bzw. die ungünstige einer schlechten, nicht passenden Glasur. Dass auch die sog. «Brennhaut» des unglasierten Porzellans, die sich in der Zusammensetzung und Struktur vom inneren Scherben unterscheidet, einen positiven Einfluss auf die Festigkeitseigenschaften hat, ist den Keramikern ebenfalls bekannt. Durch gewaltsame Verletzung bzw. Entfernung der «Brennhaut», wie das beim Schleifen der Isolatoren geschieht, wird die mechanische Festigkeit immer herabgesetzt. Nach Versuchen von *Endres* [4] muss man mit einer Verringerung von mindestens 10 % gegenüber dem unglasierten, ungeschliffenen Porzellan rechnen. Dass dieser Umstand mitunter eine wesentliche Rolle spielen kann, erhellt folgendes Beispiel. Bei einem Drehsäulenisolator, der an den beiden Enden für die Anbringung der Armaturen Längsnuten hatte, wurden die Nuten am oberen Ende nach dem Brand eingeschliffen, damit sie mit den unteren in einer zur Achse des Isolators parallelen Geraden liegen. Die geforderte hohe Torsionsfestigkeit konnte aber erst erreicht werden, als man vom Schleifen und damit vom Entfernen der «Brennhaut» Abstand nahm und die oberen Nuten ebenfalls im Rohling einformte, wobei man allerdings darauf verzichten musste, dass die Nuten in einer Geraden liegen sollen. Das Porzellan verdreht sich nämlich während des Brenn- und Schwindungsprozesses, je nach Art der Herstellung.

Auch die *Form der Armaturen* ist auf den Umbruchwert der Isolatoren nicht ohne Einfluss. Alle scharfen Kanten sowohl beim Porzellan als auch bei den Armaturen müssen vermieden werden, weil diese bei den mechanischen Beanspruchungen zu einseitigen, erhöhten Belastungen oder zusätzlichen Beanspruchungen führen und zu einem frühzeitigen Bruch des Isolators führen. Versuche in dieser Richtung ergaben eine Erhöhung des Umbruchwertes von z. B. 20 % durch zweckmässige Änderung der Armaturen und ihrer Befestigungsart. Ganz allgemein gesagt, wirken sich Kerben, worunter sowohl grössere Glasurverletzungen nach dem Brand [5] als auch Inhomogenitäten des Scherbens zu verstehen sind, festigkeitsvermindernd aus. Daraus folgt für den Keramiker, dass es zur Herstellung eines guten Porzellans unbedingt nötig ist, eine homogene Masse zu verwenden und den Brand so zu leiten, dass ein gut gesinterter, blasenfreier Scherben, der auch nach dem Abkühlen frei von inneren Spannungen ist, erzeugt wird.

Aus diesen Gründen ist auch das Auftragen von gekörnten Porzellanscherben auf die Kittstellen,

das «Sanden», einer negativen oder positiven Fischhaut vorzuziehen, wenn es auch oftmals schwierig und zeitraubend ist. Scharfe Querschnittsveränderungen wirken sich ebenfalls sehr ungünstig auf die Festigkeit aus und sollten, wo immer möglich, beseitigt werden. Durchgehende Scherbendicken von mehr als 150 mm bei Isolatoren grosser Abmessungen lassen sich bei dichten keramischen Werkstoffen nur schwer spannungsfrei trocknen und brennen und sollten daher vom Konstrukteur vermieden werden. Jedenfalls ist eine wirtschaftliche Anfertigung solcher Stücke nicht gut möglich. Man kennt auch noch kein befriedigendes Verfahren, solche starkscherbige, grosse Isolatoren auf vorhandene innere Spannungen einwandfrei zu prüfen. Die Temperatursturzprüfung scheint in diesem Fall nicht das Richtige zu sein.

Ob auch das Porzellan Ermüdungserscheinungen wie die Metalle zeigt, also ein Sinken der Festigkeitswerte nach dauernder Beanspruchung, hat nach einer von *Esau* entwickelten Methode *Treufels* [6] beschrieben. Es wurden Versuche mit Torsionsschwingungen des Porzellans durchgeführt, die ein Sinken der Dämpfung zur Folge haben, bis ein stabiler Dämpfungszustand erreicht wird. Die Prüflinge zeigten wie die Metalle, nach einer Ruhepause, Erholungserscheinungen, was auf Ermüdungsvorgänge im Porzellan schliessen lässt. Diese Ermüdung wurde versucht, auch quantitativ zu erfassen durch den Unterschied zwischen dynamischer und statischer Bruchfestigkeit. Dabei kam man zu dem Resultat, dass sich die Ermüdung im Porzellan durch eine Herabsetzung der Bruchfestigkeit von maximal 10 % bemerkbar macht, was gegenüber Metallen sehr wenig ist. Der Konstrukteur, der bei keramischen Werkstoffen aus verschiedenen anderen Gründen mit einer Streuung der Festigkeitswerte von 20 % rechnen muss, kann also die Ermüdungserscheinung ausser acht lassen.

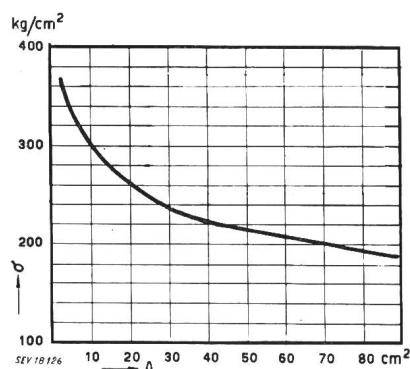


Fig. 5
Mittlere Zugfestigkeit σ eines bestimmten glasierten Hartporzellans in Abhängigkeit vom Querschnitt A

Die Resultate der Festigkeitsmessungen von keramischen Werkstoffen streuen auch unter gleichen Versuchsbedingungen um einen Mittelwert. Um genauere und brauchbare Werte zu erhalten, ist man gezwungen, viele Prüfungen durchzuführen. Völlig unzulässig ist es, aus einer oder zwei Messungen einen endgültigen Schluss auf die zu bestimmende Eigenschaft zu ziehen.

Wie schon erwähnt, sind die an bestimmten Prüfkörpern ermittelten Werte für Prüflinge anderer Form und Grösse nicht verwendbar. Da aber für den Konstrukteur meist andere Querschnitte als die der Prüflinge in Frage kommen, wird versucht, die Festigkeit des Hartporzellans in Abhängigkeit vom Querschnitt darzustellen. Fig. 5 zeigt die mittlere Zugfestigkeit und Fig. 6 die mittlere Biegefestigkeit eines bestimmten glasierten Hartporzellans in Abhängigkeit vom Querschnitt.

Um den bei keramischen Werkstoffen unvermeidlichen Streuungen gerecht zu werden, sind als Richtwerte für zulässige Beanspruchungen, je nach Form und Grösse des Isolators, 25...30 % der angegebenen Festigkeitswerte in Abzug zu bringen. Der Grund liegt darin, dass z. B. bei Langstabisolatoren, die etwas verbogen aus dem Brandofen kommen, die erreichte Zugfestigkeit vermindert ist, weil bei der Zugbelastung noch zusätzlich Biegebeanspruchungen auftreten. Ähnlich liegen die Verhältnisse bei anderen nicht formgerechten Stücken.

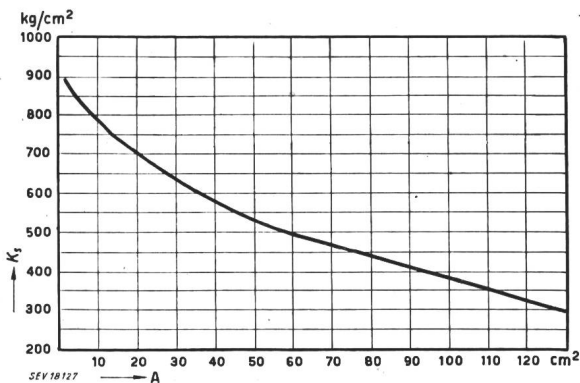


Fig. 6

Mittlere Biegefestigkeit K_b eines bestimmten glasierten Hartporzellans in Abhängigkeit vom Querschnitt A

Bei Steigerung der Belastung wird im allgemeinen der Bruch durch Überschreiten der Festigkeitsgrenze an irgendeiner Stelle des Porzellans eingeleitet. Sind im Scherben des Porzellans keinerlei Spannungen oder Unregelmässigkeiten (Luftblasen oder ähnliches) vorhanden, so wird nach Überschreiten der Zugfestigkeit der Glasur der Bruch von der Glasurschicht aus eingeleitet und auf das Innere des Porzellankörpers übertragen. In diesen Fällen ist die Bruchfläche des zerrissenen Körpers zerklüftet und rau, die erreichte Festigkeit liegt an der oberen Grenze der möglichen Festigkeitswerte. Befinden sich dagegen im Scherben Fehler (Blasen, Einschlüsse) oder eine mikroskopische Trennfläche, so sind an dieser Stelle die Kohäsionskräfte der Moleküle gestört, der Bruch wird von hier aus eingeleitet und pflanzt sich auf die übrige beanspruchte Fläche bis zum Rand fort. Die Bruchfläche ist mehr oder weniger glatt und zwar um so glatter, je grösser die Unregelmässigkeit im Porzellankörper war und je kleiner der erreichte Festigkeitswert ist. Jedenfalls lässt sich aus der Bruchfläche schon sagen, ob ein Porzellan eine hohe oder niedrige Festigkeit hatte.

Fig. 7 zeigt links die Bruchfläche eines Motorisolators von 60 mm Strunkdurchmesser, der eine Bruchlast von 8,3 t erreichte. Man sieht deutlich den zerklüfteten, rauhen Scherben. Auf dem Isolator rechts (ebenfalls ein Motorisolator von gleichem Strunkdurchmesser) erkennt man ungefähr in der Mitte deutlich eine Unregelmässigkeit im Porzellan und eine gossenteils ebene Bruchfläche, die erst

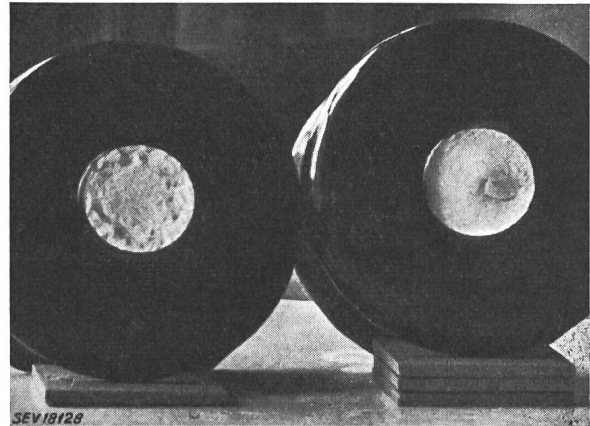


Fig. 7

Vergleich der Bruchflächen zweier Motorisolatoren
Strunkdurchmesser 60 mm
links: Bruch bei 8,3 t; rechts: Bruch bei 3 t

am Rande etwas zackig wird. Die Bruchlast betrug hiebei nur 3 t.

Abschliessend sei erwähnt, dass in den letzten Jahren die sog. «Grosszahlforschung und Häufigkeitsanalyse» auf technischen und wissenschaftlichen Gebieten Eingang gefunden hat. Sie kann mit Vorteil auch zur Nachprüfung von Festigkeitswerten an Isolatoren verwendet werden und dürfte folgerichtig angewendet einen guten Einblick in den Streubereich und in die Streuungsgrenzen von Festigkeiten der keramischen Werkstoffe geben, sowie auch zum Teil die oft sehr verwickelten Ursachen hiefür erkennen lassen.

Literatur

- [1] Gerold, E.: Einfluss der Glasur auf einige physikal. Eigenschaften des Porzellans. Hescho-Mitt". Bd. 1925, Nr. 15, S. 395.
- [2] Handrek, H.: Die Bedeutung der Glasur für die Güte und Betriebssicherheit von Porzellanisolatoren. Hescho-Mitt". Bd. 1926, Nr. 29/30, S. 679 und 879.
- [3] Neubauer, F.: Über den Einfluss der chemischen Zusammensetzung von Glasuren und der Spannung zwischen Glasur und Scherben auf einige physikalische Eigenschaften von Hartporzellan. Sprechsaal Bd. 75(1942), Nr. 39/40 und 47/48.
- [4] Endres, W.: Über den Einfluss von Glasur und Brennhaut auf die Zugfestigkeit von Porzellan. Keram. Zeitschrift Bd. 1949, Nr. 11 und 14.
- [5] Handrek, H.: Die Einwirkung von Glasurverletzungen auf die Zugfestigkeit von Motorisolatoren. Hescho-Mitt" Bd. 1926, S. 679.
- [6] Treufels, H. von: Prüfung von Isolatorporzellan. Berichte der Deutschen keramischen Gesellschaft Bd. 1935, S. 74...80.

Adresse des Autors:

Dr. Ing. Friedrich Neubauer, A.-G. für Keramische Industrie
Laufen, Röschenzstrasse 56, Laufen (BE).