



Mitteilungen der Porzellanfabrik
Ph. Rosenthal & Co. A.-G. Heft 8

Über Zerstörungs- und Alterungs-
erscheinungen an Porzellanisolatoren

Von

Dr.-Ing. K. Draeger

Oberingenieur der Porzellanfabrik Ph. Rosenthal & Co. A.-G.
Selb in Bayern

Mit 16 Textabbildungen



Berlin

Springer-Verlag Berlin Heidelberg GmbH

1926



**Mitteilungen der Porzellanfabrik
Ph. Rosenthal & Co. A.-G. Heft 8**

**Über Zerstörungs- und Alterungs-
erscheinungen an Porzellanisolatoren**

Von

Dr.-Ing. K. Draeger

Oberingenieur der
Porzellanfabrik Ph. Rosenthal & Co. A.-G.
Selb in Bayern

Mit 16 Textabbildungen



**Springer-Verlag Berlin Heidelberg GmbH
1926**

ISBN 978-3-662-31304-6 ISBN 978-3-662-31509-5 (eBook)
DOI 10.1007/978-3-662-31509-5

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

Von den früheren Heften der
„Mitteilungen der Porzellanfabrik Ph. Rosenthal & Co. A.-G.“
sind die Hefte 1, 2, 6 und 7 im Verlage von Julius Springer in Berlin W 9,
die Hefte 3—5 im Selbstverlage der Firma Ph. Rosenthal & Co. A.-G. erschienen.

Vorwort.

In der Hochspannungs-Kraftübertragung ist bis zu Betriebsspannungen von etwa 100 kV die Entwicklung zu einem gewissen Abschluß gekommen. Der größte Teil der Maschinen und Apparate ist bereits genormt, so daß sie nach Arbeitsmethoden der Massenfabrikation hergestellt werden. Auch die Porzellanisolatoren, die den empfindlichsten und gefährdetsten Teil der Kraftübertragung darstellen, dürften, was Material und Formgebung anbetrifft, für längere Zeit unverändert bleiben, nachdem die Hauptstörursachen und Fehler erkannt und abgestellt sind. Von Interesse sind daher jetzt Untersuchungen über eine etwaige Gefügeänderung, die unter dem Einfluß von elektrischen und mechanischen Belastungen im Laufe der Jahre eintreten kann, und zwar in dem Sinne, daß durch langdauernde, an und für sich zulässige Beanspruchungen eine allmähliche Verschlechterung der Eigenschaften des Porzellanmaterials („Altern“) eintritt.

Selb (Bayern), im Mai 1926.

Dr.-Ing. K. Draeger.

Inhaltsverzeichnis.

	Seite
A. Einleitung	1
B. Zerstörungsursachen an Porzellanisolatoren	1
1. Materialfehler	2
a) Porositätserscheinungen	2
b) Nichtabstimmung von Masse und Glasur	3
c) Temperaturwechselbeständigkeit	4
2. Mechanische Beanspruchungen	6
a) Treib- und Dehnungserscheinungen des Kittes und der Be- schläge.	6
b) Örtliche mechanische Überbeanspruchungen	11
3. Elektrische Beanspruchungen	13
a) Überspannungen mit steiler Wellenstirn und sinusförmige Betriebsspannungen	13
b) Herabsetzung der Überschlagsspannungen	17
C. Alterungserscheinungen an Porzellanisolatoren	19
1. Stützisolatoren	21
a) Messung des Verlustwinkels und der Öldurchschlagsspannung	21
b) Stoßprüfung	23
2. Normale Kettenisolatoren	24
a) Mechanische Zugbelastung bei gleichzeitiger Wechselstrom- prüfung	24
b) Mechanische Zugbelastung bei gleichzeitiger elektrischer Stoß- prüfung	27
c) Einfluß von Temperaturwechseln	29
3. Doppelkappen-Isolatoren	31
a) Einfluß der Vorbelastung auf die Zerreißfestigkeit	31
b) Biegeversuche	34
c) Einfluß von Temperaturwechseln	35
Zusammenfassung	36

A. Einleitung.

Es wird ein kurzer Überblick über die an Porzellanisolatoren aufgetretenen Zerstörungserscheinungen gegeben. Ferner werden Versuche mitgeteilt, die etwaige Alterungserscheinungen des Porzellans feststellen sollen.

An ausgebauten Stützisolatoren, die längere Zeit im Betrieb waren, wird mittels Verlustwinkelmessung, Stoßprüfung und Durchschlagsversuchen unter Öl untersucht, ob diese Isolatoren sich im Laufe der Zeit verschlechtert haben. Als Vergleich dienen Isolatoren derselben Lieferung, die keinerlei Beanspruchungen unterworfen waren.

An neuen Ketten-Isolatoren und Doppelkappen-Isolatoren (Motor-Isolatoren) wird versucht, künstlich Alterungserscheinungen durch übermäßige mechanische und thermische Beanspruchungen hervorzurufen.

Die Entwicklung der Isolatortechnik ist in den letzten Jahren insofern zu einem gewissen Abschluß gelangt, als die ersten und leider verhängnisvollsten Kinderkrankheiten als überwunden angesehen werden können. Auf den ersten Blick erscheint es verwunderlich, daß der Ausbildung eines so einfachen Körpers, wie ihn der Hochspannungsisolator darstellt, so besonders hohe Bedeutung beigelegt wird. Vergewahrtigt man sich jedoch, daß ein einziger Isolatorenfehler unter Umständen ganze Industriebezirke lahmlegen kann, so erscheinen die hohen Anforderungen, die heute an Isolatoren gestellt werden, durchaus berechtigt.

In den folgenden Darlegungen sollen zunächst die Ursachen besprochen werden, die in den letzten Jahren am häufigsten zu Isolatorenschäden und Betriebsstörungen geführt haben. Es werden dann ferner Versuche angegeben, die etwaige Alterungserscheinungen des Porzellans, also seine allmähliche Verschlechterung, näher erforschen sollen.

B. Zerstörungsursachen an Porzellanisolatoren.

Für die Auswirkung der Störungen, die durch Isolatorenschäden hervorgerufen werden, ist es im Grunde genommen gleichgültig, ob das Versagen der Isolatoren in der schlechten Beschaffenheit

der Porzellanmasse oder in der Wirkung der Bindemittel bzw. Beschläge zu suchen ist. Dagegen ist es für die Abstellung der Fehler von allergrößter Wichtigkeit, daß die Porzellanfabriken die Ursachen des Versagens erfahren. Diesem Gesichtspunkt tragen die meisten Überlandwerke heute dadurch Rechnung, daß sie für jeden einzelnen Isolator eine Art Stammrolle anlegen, in der alle erforderlichen Angaben, wie Herstellerfirma, Herstellungszeit, Einbauzeit, Abnahmeergebnisse usw. angegeben sind. Leider sind diese Aufstellungen aus früherer Zeit meistens nur unvollständig vorhanden, so daß erst die letzten Jahre ein einigermaßen sicheres Bild ergeben. Es ist dies besonders unangenehm, da viele Isolatorschäden sich erst nach längerer Betriebsdauer bemerkbar machen, so daß Isolatorarten, die in den Prüffeldern sehr gute Ergebnisse gezeigt haben, unter Umständen im Betriebe versagen. Das auffallendste Gegenstück hierzu bilden zum Beispiel die Hewlett-Isolatoren, die im Prüffeld in jeder Beziehung allen anderen Typen bei weitem unterlegen sind: Die Hewlett-Isolatoren haben niedrige Durchschlagsspannungen. Sie verhalten sich ungünstig bei Stoßspannungen, sie ergeben niedrige Überschlagsspannungen unter Regen. Trotzdem haben sie sich im Betrieb durchaus nicht so schlecht bewährt, wie man nach den Prüffeldergebnissen erwarten sollte.

1. Materialfehler.

Die Wirkung von Hohlräumen, die durch schlechtes Schlagen der Masse, von Schlieren und Schnecken, die durch ungeeignetes Drehen entstehen, von Brennrissen usw. soll hier außer acht gelassen werden, da diese Fehler bei guter Fabrikation selten vorkommen, und diese Isolatoren außerdem schon bei oberflächlicher Besichtigung ausgeschieden werden können. Werden diese fehlerhaften Stücke aber auch bei der Prüfung nicht ausgeschieden, so liegen die Fehler an Stellen, die elektrisch oder mechanisch nicht beansprucht werden, so daß sie dann völlig ungefährlich sind.

a) **Porositäterscheinungen.** In lufttrockenem bzw. verglühtem Zustande ist die Porzellanmasse außerordentlich porös, d. h. sie saugt Feuchtigkeit begierig auf. So erwünscht diese Porosität zum Aufbringen der flüssigen Glasur ist, so unbrauchbar ist sie beim fertiggebrannten Isolator. Da im Brennofen sich praktisch niemals die gleiche Temperatur an allen Stellen erreichen läßt,

kann es nun bei falscher Brandführung vorkommen, daß ein Isolator, der an einer kälteren Stelle steht, nicht völlig durchbrennt, während die Glasur, die schon bei niedriger Temperatur flüssig wird, einen gleichmäßig durchgebrannten Scherben vortäuscht. Poröse Stücke sind also weniger auf die Beschaffenheit der Masse selbst, als auf mangelhafte Brandführung zurückzuführen. Glücklicherweise lassen sich schwach gebrannte poröse Stücke schon stets bei der Vorprüfung ausscheiden, wobei der Kappen-Isolator bei der elektrischen Prüfung durchschlägt, während der poröse Doppelkappen-Isolator (Motorisolator) bei der mechanischen Zugprüfung ausfällt.

Die Porositätsprüfung ist wegen ihrer großen Bedeutung schon seit langer Zeit von den Porzellanfabriken wesentlich schärfer ausgeführt worden, als sie von dem VDE vorgeschrieben ist. Während ursprünglich der Nachweis der Dichtheit des Scherbens nach den VDE-Vorschriften nur dadurch gebracht werden brauchte, daß eine auf den Scherben gebrachte alkoholische Fuchsinlösung nicht eindringen durfte, geschah praktisch die Prüfung in den Porzellanfabriken stets so, daß Porzellanscherben unter hohem Druck (einige 100 Atmosphären) mehrere Stunden lang in der Lösung gelassen wurden. Durch Zerschlagen der herausgenommenen Stücke läßt sich eine etwaige Porosität dann einwandfrei nachweisen¹⁾. In dieser Form ist die Porositätsprüfung ein wichtiges Hilfsmittel zur Betriebsüberwachung.

Die Wirkung der Porosität äußert sich im Isolator derart, daß allmählich durch Kapillaritätswirkung das Wasser den ganzen Scherben durchzieht und schließlich, oft erst nach Jahren, den Durchschlag herbeiführt. Eine gut zusammenhängende Glasur kann dabei das Eindringen des Wassers zwar verlangsamen, aber nicht völlig verhindern, da stets der Teil des Isolators, auf dem letzterer beim Brande aufgesessen hat, unglasiert ist. Bei der hohen Brenntemperatur der deutschen Porzellane kommen poröse Scherben nur in Ausnahmefällen vor.

b) Nichtabstimmung von Masse und Glasur. Obgleich die Glasur also die Nachteile eines porösen Scherbens nicht aufheben kann, kommt ihr doch eine große Bedeutung zu. Sie soll nach den VDE-Vorschriften glatt und glänzend sein. Dadurch soll in der Hauptsache das Ansetzen von Staub, Ruß usw. vermieden

¹⁾ R. Pfeiffer: ETZ. 1925, S. 1078.

werden, da hierdurch die Überschlagespannung des Isolators wesentlich herabgesetzt wird. Da die Glasur dichter und glatter ist als der eigentliche Porzellanscherben, bietet sie mehr Widerstand gegen atmosphärische Einflüsse. Tatsächlich zeigen Porzellanisolatoren auch nach jahrelanger Verwendung eine noch vollkommen glatte und glänzende Oberfläche, während z. B. Glasisolatoren allmählich rauh werden. Andererseits braucht man aber bei Glasurfehlern nicht allzu ängstlich sein, wenn sie an Stellen sich befinden, an denen entweder ein Ansetzen von Staub weniger leicht möglich ist, oder an Stellen, die auch bei Verschmutzung keine wesentliche Herabsetzung der Überschlagespannung verursachen. Es muß nur dafür gesorgt werden, daß die glasurfreien Stellen glatt geschliffen werden, damit nicht das in etwaige kleine Risse eingedrungene Wasser beim Gefrieren Ausprengungen verursacht. Das Überstreichen mit Lack ist an und für sich zwecklos. Bei farbigen Glasuren empfiehlt sich jedoch ein gleichfarbiger Anstrich der glasurfreien Stellen, damit die weißen Flecken später im Betrieb nicht Beschädigungen vortäuschen.

Schäden von großer Tragweite entstehen dann, wenn die an und für sich völlig einwandfreien Massen und Glasuren nicht aufeinander abgestimmt sind¹⁾. An der Trennfläche entstehen nämlich Spannungen, wenn die Ausdehnung von Scherben und Glasur wesentlich verschieden ist. Besitzen dabei Scherben und Glasur eine zu geringe Elastizität, so entstehen entweder sofort bei der Abkühlung nach dem Brennen Glasurrisse oder, was noch unangenehmer ist, die Spannung zwischen Glasur und Scherben wird erst später im Betrieb durch äußere Einflüsse, wie Temperaturwechsel, Ritzen der Glasur usw., ausgelöst. Je nach der Art der Beanspruchung und je nach den physikalischen Eigenschaften des Materials entstehen dabei netzförmige Haarrisse, oder die Glasur hebt sich überhaupt vom Scherben ab. Sammelt sich dann in den Zwischenräumen Wasser an, so ist eine Zerstörung des Isolators unvermeidlich.

c) **Temperaturwechselständigkeit.** Entstehen beim Brennen bzw. beim zu raschen Abkühlen durch ungleiche Dehnung oder Zusammenziehung innere Spannungen im Scherben, so können diese bei plötzlicher Temperaturänderung ausgelöst werden und

¹⁾ Über die Zusammengehörigkeit keramischer Massen und Glasuren. Rosenthal-Mitteilung 1917.

ein Springen des Isolators verursachen. An der Oberfläche treten beim Abkühlen Zugspannungen, beim Erwärmen Druckspannungen auf, im Innern des Scherbens ist es gerade umgekehrt. Es folgt daraus, daß für die Oberfläche, besonders also die Glasur, ein plötzliches Abkühlen am gefährlichsten ist, da die Zugfestigkeit des Porzellans wesentlich geringer ist als die Druckfestigkeit, und der Bruchwert von etwa 250 kg/cm^2 beim Abkühlen erreicht werden kann. Die im Innern auftretenden Zugspannungen

sind dagegen geringer, weil der beanspruchte Querschnitt größer ist. Im allgemeinen dürften bei dem heute in Deutschland verwendete-

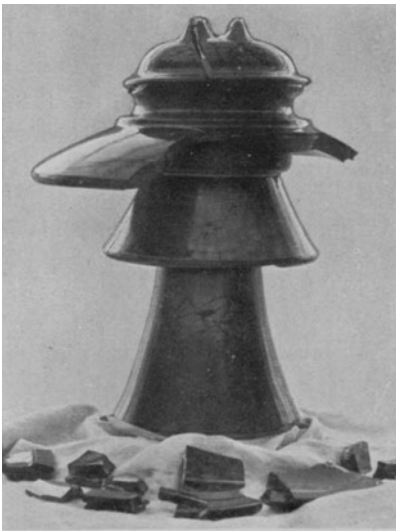


Abb. 1. Infolge von Temperaturwechseln zersprungener Glasisolator ($+60^{\circ} \text{C}$, $+15^{\circ} \text{C}$).

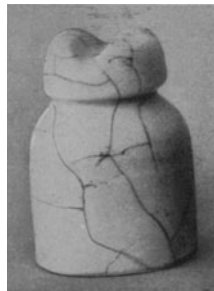


Abb. 2. Glasurrisse an einer Telegraphenglocke nach fünfmaligen schroffen Temperaturwechseln zwischen $+100^{\circ} \text{C}$ und -20°C .

ten Porzellanmaterial die durch Temperaturstürze verursachten Schäden praktisch verschwindend gering sein. Größere Temperaturstürze, wie 60°C , sind kaum denkbar; in Wirklichkeit halten aber die Isolatoren weit höhere Temperaturdifferenzen aus, ohne daß irgend welche Risse in der Glasur oder im Scherben auftreten; allerdings zeigen dabei die einzelnen Massen erhebliche Unterschiede. (Abb. 1. Zersprungener Glasisolator.) So zeigt Abb. 2 eine Telegraphenglocke aus feldspatreicher Masse, die von $+100^{\circ} \text{C}$ fünfmal auf -20°C abgekühlt und dann in eine Fuchsinlösung gebracht wurde. Während die Masse trotz ihrer verhält-

nismäßig großen Temperaturempfindlichkeit diese Temperaturstürze von 120° C ausgehalten hat, ist die Glasur an vielen Stellen gerissen, da die in der Glasurschicht plötzlich auftretenden Zugspannungen den zulässigen Wert überschritten haben. Abb. 3 zeigt einen Isolator aus einer noch empfindlicheren Masse, der beim Abkühlen an der Stelle auseinander gerissen ist, die ebenfalls in der Hauptsache auf Zug, — und zwar bei dieser Formgebung im ganzen Bruchquerschnitt, — beansprucht ist.



Abb. 3. Durch schroffen Temperaturwechsel auseinandergerissene Telegraphenglocke. (+ 100° C, — 20° C).

Isolatoren aus einer anderen Masse hingegen halten anstandslos diese Temperaturstürze aus. Aus Abb. 3 erkennt man weiter, daß auch die Formgebung bei diesen Beanspruchungen eine wichtige Rolle spielt. Der Isolator ist dort am gefährdetsten, wo plötzliche Querschnittsänderungen vorhanden sind. Die Temperaturwechselbeständigkeit ist daher keine Materialkonstante, sondern hängt in hohem Maße von der Form des Isolators ab. Daraus ergibt sich die Forderung, daß der Isolator an allen Stellen

den gleichen Querschnitt aufweisen soll. Wenn sich auch diese Forderung praktisch nicht restlos verwirklichen läßt, so wird doch bei unvermeidbaren Querschnittsänderungen ein allmählicher Übergang geschaffen¹⁾.

2. Mechanische Beanspruchungen.

Während die durch Materialfehler verursachten Fehler bei deutschen Porzellanen verschwindend gering sind, sind die Ausfälle, die auf Kittung und unrichtige Befestigung der Beschläge zurückzuführen sind, zeitweise beängstigend hoch gewesen. In der Hauptsache sind die dabei auftretenden mechanischen Überbeanspruchungen des Porzellans, mit denen man früher nicht gerechnet hatte, die eigentliche Ursache gewesen.

a) Treib- und Dehnungserscheinungen des Kittes und der Beschläge. Beim Übergang zu hohen Spannungen wird die ein-

¹⁾ Benischke, G.: ETZ. 1919, S. 486, ETZ. 1920, S. 37. Rosenthal, E.: ETZ. 1919, S. 642.

teilige Herstellung der Stützisolatoren technisch unmöglich oder wenigstens außerordentlich unwirtschaftlich. Man ging daher dazu über, die Isolatoren zu unterteilen, getrennt zu drehen und zu brennen, und dann mittels Zement zusammenzukitten. Nach 2—3 Jahren zeigten sich an diesen Isolatoren Risse, wobei entweder der Kopf, also das Oberteil des Isolators, durch einen kegelmantelförmigen Riß abgehoben wurde (Abb. 4), oder der Kopf durch radiale Sprünge zerstört wurde. (Abb. 5.) Die Ursache hierfür ist bekanntlich der anfangs zum Kitten verwendete reine Portland-Zement¹⁾), der einen höheren Ausdehnungskoeffizienten

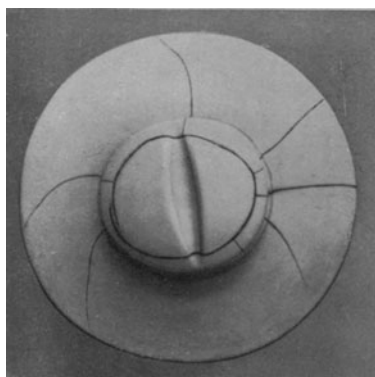


Abb. 4. Treibwirkung des Zementes an einem zweiteiligen Isolator mit eckigem Unterteil.

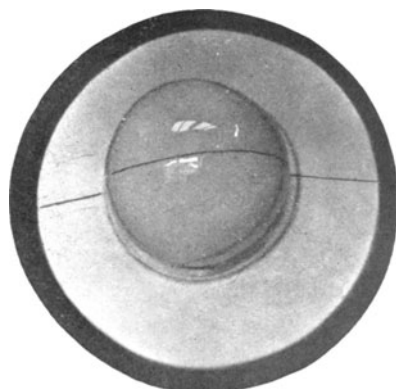


Abb. 5. Treibwirkung des Zementes an einem zweiteiligen Isolator mit rundem Kopf und Unterteil.

hat als das Porzellan. Durch Magerungsmittel ist es möglich, die Wärmedehnung von Zement und Porzellan annähernd gleich zu machen, so daß durch Ausdehnungserscheinungen, bedingt durch Temperaturänderungen, keine Fehler mehr entstehen können.

Durch langjährige Versuche³⁾ ist aber ferner festgestellt worden, daß außerdem noch der Zement treibt, wobei sich diese Wirkung erst nach längerer Zeit äußert, wenn nach mehreren Jahren der Zement vollständig erhärtet ist und seine frühere, wenn auch sehr geringe, Elastizität völlig eingebüßt hat. Da-

1) Meyer, E. O.: ETZ. 1919, S. 173, 188, 198.

2) Schendell: ETZ. 1919, S. 317.

3) Rosenthal, E., u. Luftschitz, H.: Rosenthal-Mitteilung Nr. 4. Gerold, E.: Hermsdorf-Mitteilung Nr. 12.

bei hat es sich herausgestellt, daß die hierdurch bewirkte Ausdehnung des reinen Zementes bzw. des unzuweckmäßig gemagerten Zementes je nach der besonderen Zusammensetzung ein Vielfaches der Wärmedehnung ausmacht. Die Treibwirkung, die durch nachträgliche Wasseraufnahme verursacht wird und daher als eine Art Quellung aufzufassen ist, wird zum Teil dadurch unterbunden, daß nach dem Abbinden die mit der Luft in Verbindung stehende Zementoberfläche mit einem wasserundurchlässigen Lackanstrich versehen wird¹⁾. Einen vollkommenen Abschluß stellt man dadurch her, daß man nach dem Vorschlag von A. Bültemann (DRP.) jedes einzelne Zementkörnchen mit einer wasserundurchlässigen Haut aus einem Teerprodukt überzieht (Permanitzement)²⁾. Dieser Zusatz wird mit dem Zement in fein verteilter Form gemischt. Nach dem Abbinden wird der Isolator auf die Schmelztemperatur des Zusatzes erwärmt, so daß das flüssige Teerprodukt die Zwischenräume des Zementgefüges ausfüllt und die Zementteilchen einwandfrei von der Atmosphäre abschließt.

Von außerordentlicher Wichtigkeit ist bei zementgekitteten Isolatoren die Formgebung. Während die Isolatoren ähnlich Abb. 6, also mit eckigen Köpfen und scharfen Begrenzungsflächen, fast stets zerstört worden sind, haben sich solche nach Abb. 7, also mit kugeligem Kopf, auch bei Verwendung von treibendem Zement, weit besser bewährt; dagegen hat man schlechte Erfahrungen mit dem Isolator mit Schulteransätzen nach Abb. 8 gemacht, wobei die Schulteransätze ein besseres Zentrieren ermöglichen sollten; in Wirklichkeit aber wurde dadurch die Ausdehnungsmöglichkeit des Zementes völlig unterbunden.

Anstatt mehrteilige Isolatoren zusammenzuzementieren, können die einzelnen Teile auch zusammenglasiert werden, wobei die getrennt gedrehten Teile in lufttrockenem Zustande in eine leichtflüssige Glasurmasse getaucht werden. Beim Brennen verbindet die schmelzende Glasur die einzelnen Teile.

Die Erfahrungen mit zusammenglasierten Isolatoren sind nicht schlecht, vorausgesetzt, daß die einzelnen Teile genau gedreht und so zusammengesetzt sind, daß beim Brennen an den zusammen-

¹⁾ Creighton-Hunt: J.A.J.E.E. 1921, S. 480; ETZ. 1921, S. 1266.

²⁾ Rosenthal, E.: ETZ. 1924, S. 333. Bültemann, A.: ETZ. 1924, S. 1026.

glasierten Stellen keine Spannungen entstehen; z. B. sind die von der Porzellanfabrik Rosenthal hergestellten Isolatoren nach

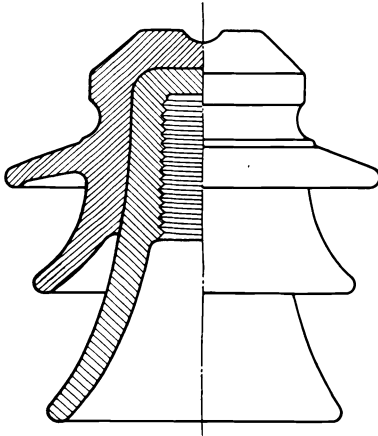


Abb. 6. Zweiteiliger zusammengesetzter Isolator mit eckigem Unterteil.

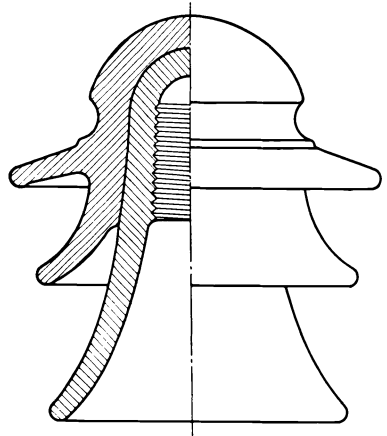


Abb. 7. Zweiteiliger zusammengesetzter Isolator mit rundem Kopf und Unterteil.

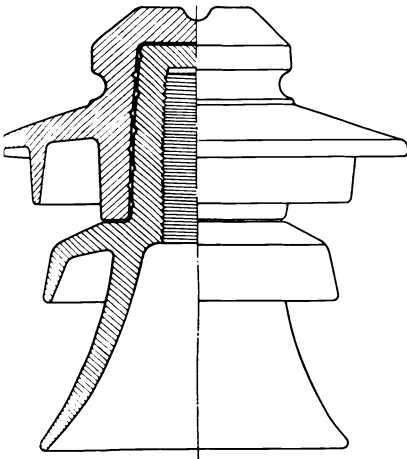


Abb. 8. Zweiteiliger zusammengesetzter Isolator mit Schulteransätzen.

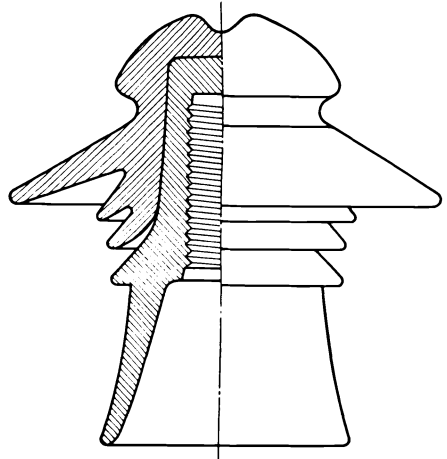


Abb. 9. Zweiteiliger zusammenglasierter Stützisolator.

Abb. 9, die im Jahre 1906 in größeren Mengen nach der Schweiz geliefert wurden, heute noch anstandslos im Betrieb.

Bei den ersten gekitteten Hängeisolatoren ergaben sich natürlich dieselben Zerstörungen wie bei Stützisolatoren. Die Ausfälle waren hier sogar noch größer, weil nicht nur die Wirkung des Zementes, sondern auch die große Ausdehnung der Eisenteile in die Erscheinung trat (Abb. 10). Zerstörend wirkten dabei nur die in den Porzellankörper eingekitteten Teile, also bei den normalen

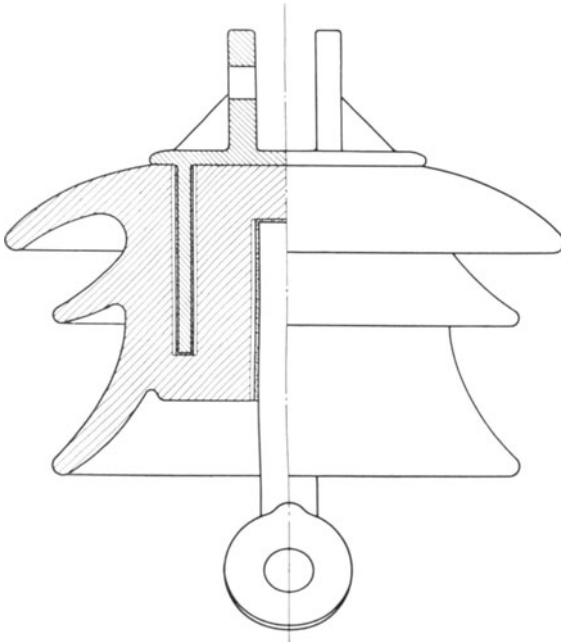


Abb. 10. Hängeisolator mit einzementierten Beschlägen.

Kettenisolatoren die Bolzen, während die Befestigung der Kappen mit Zement unschädlich ist, und auch heute noch allgemein angewendet wird. Da nämlich die Ausdehnung von Eisen und Zement größer ist als die von Porzellan, sind die durch die Kappe entstehenden Druckbeanspruchungen an dem innen befindlichen Porzellankopf gering.

Obleich man bei Verwendung von gemagertem bzw. Permantzement keinerlei Treiberscheinungen mehr zu befürchten hat, ist man in Deutschland doch allgemein zur kittlosen Bolzen-

befestigung übergegangen, wobei der Zement im Isolatorennieren ganz vermieden wird.

In Amerika wird das Einzementieren der Klöppel noch allgemein angewendet. Durch besondere Maßnahmen (Erwärmen) wird dafür gesorgt, daß während des Abbindens des Zementes, der etwa die gleiche Ausdehnung hat wie das Porzellan, der Eisenbolzen mit seiner höheren Ausdehnungszahl einen geringen Spielraum hat. In Deutschland verkleidet man bei zementgekitteten Hängeisolatoren die Porzellanwände bzw. den Klöppel mit einer elastischen Zwischenlage, meistens in Form eines elastischen An-

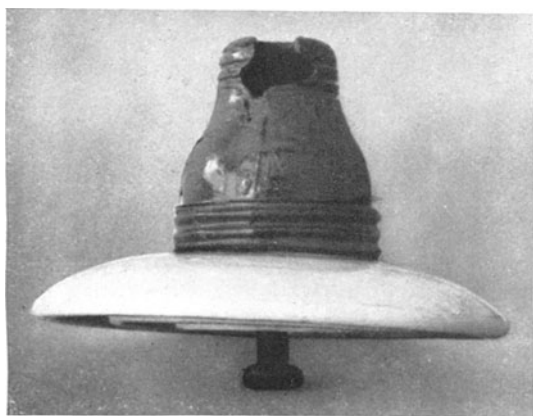


Abb. 11. Hängeisolator mit einer unmittelbar auf dem Porzellanteller aufsitzenden Eisenkappe.

striches, während bei den permanitgekitteten Isolatoren durch die zum Verschmelzen erforderliche hohe Temperatur ebenfalls ein genügender Spielraum für die Ausdehnung des Bolzens entsteht, ohne daß die die mechanische Festigkeit herabsetzenden elastischen Zwischenlagen notwendig sind.

Eine eigenartige, sehr häufig vorgekommene Zerstörungerscheinung zeigten Isolatoren nach Abb. 11, bei denen die Eisenkappe unmittelbar auf dem Porzellanteller aufsaß. Durch die Ausdehnung des Eisens ist der Porzellanteller vollständig abgeschert worden.

b) **Örtliche mechanische Überbeanspruchungen.** In weit geringerem Maße sind Isolatorenzerstörungen dadurch aufgetreten,

daß dem Material von vornherein zu große mechanische Beanspruchungen zugemutet worden sind. Bei vielen Isolatorformen treten nämlich bei starken mechanischen Belastungen feine Risse auf, die einen elektrischen Durchschlag zur Folge haben. Dies ist besonders bei kittlosen Konstruktionen der Fall, bei denen die Eisenbolzen ohne genügende elastische Zwischenlagen auf dem Porzellan aufliegen, so daß die spezifische Belastung an einigen Stellen zu hoch wird (vgl. S. 26).

Bei Stützisolatoren ist dem Aufhanfen besondere Aufmerksamkeit zuzuwenden, da besonders bei mehrteiligen Isolatoren die

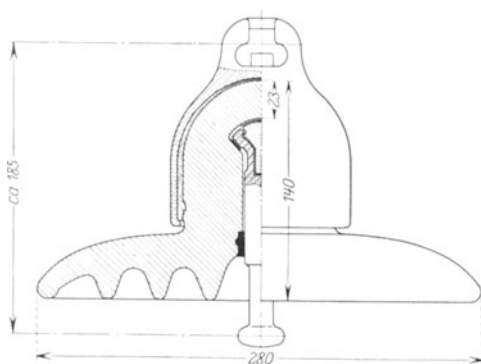


Abb. 12. Kegelkopfisolator 10957: Große Sicherheit gegen Biegebungsbeanspruchungen.

Hülse durch zu starke Hanfbeilagen und zu scharfes Eindrehen gesprengt werden kann. Vielfach wird die Rißbildung nicht sofort bemerkt, so daß nachher im Betrieb die Hülse durchschlägt und der entstehende Lichtbogen den Isolator zerstört.

Auf mechanische Überbeanspruchungen ist auch die Erscheinung zurückzuführen, daß bei Hängekettensystemen vielfach das oberste Glied mehr zu Ausfällen neigt als die übrigen, während die größte elektrische Beanspruchung, herrührend von der Betriebsspannung, von dem untersten Glied aufgenommen werden muß¹⁾.

Bei Abspannkettensystemen sind die auftretenden Biegebungsbeanspruchungen zu beachten. Ist die Widerstandsfähigkeit des Bolzens zu gering gegen seitliche Beanspruchungen, so wird der Bolzen aus der Symmetrielage gedrückt und liegt einseitig am Porzellanrand an, wodurch Beschädigungen des Isolator Tellers hervorgerufen werden. Das Bolzenloch soll daher möglichst nicht größer sein als der Bolzen, damit eine genügend lange Führung durch das Porzellan, wie z. B. beim Kegelkopfisolator, vorhanden ist (Abb. 12).

¹⁾ Panton, H. D.: J.A.J.E.E. 1925, S. 474. ETZ. 1925, S. 1552.

3. Elektrische Beanspruchungen.

Den geringsten Anteil an Isolatoren Schäden haben rein elektrische Zerstörungen. Es liegt dies daran, daß jeder Isolator so gebaut ist, daß er im allgemeinen früher überschlägt als durchschlägt, und jeder Isolator im Prüffeld bis zur Überschlagsspannung geprüft wird. Immerhin ist nach Abstellung der größten mechanischen Fehlerursachen heute der elektrischen Festigkeit größeres Augenmerk zuzuwenden.

a) **Überspannungen mit steiler Wellenstirn und sinusförmige Betriebsspannungen.** Beim Auftreten steiler Gleichstromspannungen kann die am Isolator liegende Spannung über den bei Wechselstrom möglichen Wert ansteigen, ohne daß der Isolator überschlägt. Zur Ionisierung des Überschlagwertes ist ebenso wie bei Nadelfunkenstrecken eine gewisse Zeit erforderlich (etwa 10^{-7} Sek). Bei Wellen mit sehr steiler Stirn kann aber innerhalb dieser Zeit die am Isolator anliegende Spannung die Wechselstrom-Überschlagsspannung wesentlich überschreiten und die Durchschlagsspannung erreichen. Derartige Stoßspannungen treten nun tatsächlich auf der Leitung auf, verursacht entweder durch atmosphärische Entladungen oder Schaltvorgänge¹⁾. Während die durch Schaltvorgänge ausgelösten Überspannungen in der Hauptsache das unterste Glied beanspruchen, treffen die durch atmosphärische Entladungen ausgelösten Wellen in voller Stärke zunächst auf das oberste Glied der Isolatorenkette, so daß die obersten und untersten Glieder die größten elektrischen Beanspruchungen aushalten müssen, während die dazwischenliegenden Glieder so lange geschützt sind, als kein Überschlag an den äußeren Gliedern erfolgt. Durch besondere Gleichstromstoßanlagen haben die Porzellanfabriken versucht, diese Stoßspannungen nachzuahmen und schlechte Isolatoren schon im Prüffeld auszuscheiden²⁾.

Abb. 13 zeigt einen charakteristischen Stoßdurchschlag mit wellenförmigem Bruch.

Abb. 14 zeigt eine Hewlett-Kette, die im Betrieb durchschlagend ist. Sie zeigt dasselbe Bruchbild, und zwar den Durchschlag

¹⁾ Matthias, ETZ. 1925, S. 873. ETZ. 1923, S. 37.

²⁾ Bucksath, W.: ETZ. 1923, S. 943, 975, 1106. Rosenthal-Mitteilung Nr. 2. Marx, E.: ETZ. 1924, S. 652. Hermsdorf-Mitteilung Nr. 10. Töpler, M.: ETZ. 1924, S. 1045.

an einer Stelle, die bei Wechselstrom wohl kaum durchschlagen werden könnte.

Die Vorgänge bei Stoßbeanspruchung sind wenig geklärt. Es scheint aber, als ob durch die Stoßprüfung auch Isolatoren ausgeschieden würden, die im Betrieb wahrscheinlich nicht ausgefallen wären, so daß der bei der Stoßprüfung eintretende Ausfall wirtschaftlich nicht immer gerechtfertigt erscheint. Die praktische Bedeutung der Stoßprüfung kann sich erst in einigen Jahren zeigen. Um feststellen zu können, ob sich mit Stoßprüfung geprüfte Isolatoren

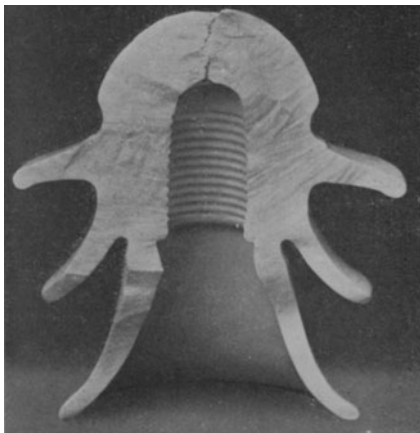


Abb. 13. Stoßdurchschlag mit wellenförmigem Bruch an einteiligem Deltaisolator.



Abb. 14. Durch Überspannungen im Betrieb beschädigte Hewlettkette.

besser bewähren als die nur der normalen Wechselstromprüfung unterworfenen, werden alle stoßgeprüften Isolatoren in den Porzellanfabriken gekennzeichnet.

Sehr gering dürften schließlich bei den heutigen Übertragungsleitungen die Ausfälle sein, die auf ungleichmäßige Spannungsverteilung der Betriebsspannung zurückzuführen sind. Bekanntlich nimmt bei einer 6gliedrigen Hängekette das unterste Glied bei Wechselstrom etwa 25% der ganzen Spannung auf, das sind bei 100 kV etwa 25 kV. Da die Isolatoren aber mit 75 kV geprüft

werden, kann auch eine Dauerbelastung von 25 kV keine Ausfälle ergeben. Etwas anderes wird es bei höheren Betriebsspannungen, z. B. 220 kV oder gar 380 kV. Der Anteil des untersten Gliedes sinkt dann nur noch wenig und bleibt etwa 20%, auch bei Verwendung einer größeren Gliederzahl. Das bedeutet bei 220 kV Betriebsspannung schon 44 kV Gliedspannung. Dazu kommt, daß bei Beanspruchung mit steilen Gleichstromspannungen die Spannungsverteilung noch wesentlich ungünstiger ist. Zahlentafel I zeigt den Spannungsanteil des untersten Gliedes bei sinusförmiger Wechselspannung und bei Stoßspannung.

Zahlentafel I.

	Gliederzahl	Spannungsanteil des unterst. Gliedes bei 220 kV Betriebsspannung %	Spannungsanteil des unterst. Gliedes bei Stoßspannungen %
Kegelkopfisolator 10957 ohne Schutzring	12	20	36
Kegelkopfisolator 10957 mit Schutzring von 50 cm Durchmesser	12	14	20
Großkegelkopf-Abspannisolator 11298 ohne Schutzring	10	22	37
Großkegelkopf-Abspannisolator 11298 mit Schutzring von 80 cm Durchmesser	10	16	17
Großkegelkopf-Hängeisolator 11327 ohne Schutzring	9	21	37
Großkegelkopf-Hängeisolator 11327 mit Schutzring von 80 cm Durchmesser	9	16	17

Während bei etwa sinusförmiger Wechselspannung die Spannungsverteilung mit höher werdender Spannung immer gleichmäßiger wird, dadurch, daß das unterste Glied selbsttätig seine Kapazität vergrößert, ist das bei Stoßspannungen weniger der Fall. Wegen des Entladeverzuges kann die Spannung sehr hoch ansteigen, ohne daß die Isolatorkapazität durch Glimmlicht vergrößert wird. Der Stoßspannungsanteil überlagert sich also fast in voller Höhe dem Spannungsanteil, der von der Betriebsspannung herrührt, so daß die Durchschlagsspannung der am stärksten beanspruchten untersten, unter Umständen auch der obersten Glieder

erreicht werden kann. Bei hoher Betriebsspannung kommt man daher ohne willkürliche Beeinflussung der Spannungsverteilung, vor allen Dingen der Stoßspannungsverteilung, nicht mehr aus (Schutzkörbe, Ringe usw.).

Bei Hewlett-Isolatoren sind Ausfälle, die auf deren geringe Durchschlagsspannung zurückgeführt werden müssen, wenig beobachtet worden, dagegen haben die Seilschlingen Veranlassung zu Störungen gegeben. Durch Entladungen an den Kanälen wird vielfach das Kupferseil angegriffen und allmählich zerstört. Ferner schmelzen bei einem länger dauernden Lichtbogen verhältnismäßig leicht die Seile ab.

Eine überraschende Erscheinung zeigt sich in neuerer Zeit bei aufgehanften und zusammengehanften Stützisolatoren. Der Hanf verkohlt zunächst außen, die Zerstörung geht allmählich weiter nach innen, so daß schließlich der Isolator lose auf der Stütze sitzt¹⁾. Als Ursache sind Glimmentladungen anzusehen, die bei ungünstiger Spannungsverteilung zwischen Stütze und Isolatorenrand bzw. zwischen zwei Scherben auftreten²⁾. Abhilfe kann geschaffen werden, entweder durch Leitendmachen des Hanfes oder durch elektrische Verbindung von Stütze und Innenteil der Hülse, wobei letztere innen mit einem leitenden Graphitanstrich versehen sein muß. Die Porzellanfabrik Rosenthal verwendet statt des Hanfes imprägniertes Preßtuch (D.R.P.), bei dem diese Erscheinungen nicht beobachtet worden sind.

Bei Porzellanisolatoren, die unter Öl Verwendung finden, ist zu beachten, daß die Verhältnisse unter Öl gänzlich anders liegen als in der Luft. Unter Öl kann sich der Isolator nicht wie in der Luft gegen übermäßige örtliche Feldverdichtungen schützen; die gefährdetsten Stellen liegen daher unter Öl anders als in der Luft. Während ferner Überschläge in Luft den Isolator meistens nicht beschädigen, falls der Lichtbogenstrom nicht zu groß ist, wird unter Öl der Isolator durch den Lichtbogen, ja sogar durch schwache Vorentladungen, beschädigt, das Porzellan erhält Anfressungen an der Oberfläche, also an der Trennfläche Öl-Porzellan. Die Erscheinung ist noch nicht vollständig geklärt. Wahrscheinlich sind

¹⁾ Schendell: ETZ. 1919, S. 317. Draeger, Rosenthal-Mitteilung Heft 7, S. 12. Weicker, W.: Mitt. d. V. d. E.W. 1925, S. 560.

²⁾ Daneben dürften bei der Zerstörung des Hanfes auch nitrose Gase mitwirken, die sich bei Glimmentladungen im Stützenloch bilden.

es lediglich Wärmewirkungen. Die geringste elektrische Festigkeit ist an der Trennfläche vorhanden, so daß der Lichtbogen bzw. die Vorentladungen unmittelbar am Porzellan entlang kriechen und allmählich die Oberfläche zerstören.

b) Herabsetzung der Überschlagespannungen. Bei der heutigen Vermaschung der Netze ist der Erdschlußstrom so groß, daß bei Überschlägen fast stets Beschädigungen am Isolator bewirkt werden, wenn der Lichtbogen einige Zeit bestehen bleibt. Eine hohe Überschlagespannung ist demnach heute außerordentlich wichtig. Es muß alles vermieden werden, was die ursprünglich genügend hohe Überschlagespannung herabsetzt.

Die viel vertretene Ansicht, daß die Freileitung gewissermaßen das Sicherheitsventil für Überspannungen für die ganze Anlage bilden soll, ist sehr gefährlich, denn jeder Überschlag ruft nicht nur die an sich geringen Beschädigungen am Isolator hervor, sondern gefährdet durch die dem Überschlag folgenden Überspannungen vor allem auch die Maschinen und Apparate. Aus diesem Gesichtspunkt heraus muß gefordert werden, daß der Sicherheitsgrad der ganzen Anlage möglichst hoch und annähernd gleich ist.

An und für sich beträgt auch bei starkem Regen die Überschlagespannung noch mehr als den doppelten Wert der Betriebsspannung. Stark herabgesetzt wird aber die Überschlagespannung durch Ablagerungen von Ruß, Staub, Zement, Salz usw. Während diese Ablagerungen im trockenen Zustande keinen merklichen Einfluß auf die Überschlagespannungen haben, treten bei feinem Regen, besonders aber bei starkem Nebel Überschläge bei sehr niedrigen Spannungen auf. An einem mit einer mehrere Millimeter starken Zementschicht bedeckten Isolator wurde die Herabsetzung der Überschlagespannungen bei völlig benetztem Isolator auf 40% des Wertes festgestellt, den der unverschmutzte Isolator bei 3 mm Regen von 150 Mikro-Siemens hatte.

Der Einfluß von Ruß, der sich besonders an Bahnisolatoren ansetzt, scheint nicht immer so stark zu sein und jedenfalls von der Art des Rußes abzuhängen. Dagegen können auf elektrisierten Bahnlagen die heißen Rauchgase von Dampflokomotiven an Unterführungen Isolatorenüberschläge hervorrufen¹⁾.

¹⁾ Parodi: ETZ. 1916, S. 68.

Sehr unangenehm sind die Salzablagerungen an der Meeresküste. In einigen Fällen ist dabei eine genügende Isolierung vollkommen unmöglich. Nach einer gewissen Zeit erfolgen Überschläge. Es bleibt dann nichts anderes übrig, als die Isolatoren von Zeit zu Zeit zu reinigen, so daß zwei vollständige Übertragungssysteme zur Aufrechterhaltung des Betriebes erforderlich sind.

Besonders viel Störungen werden neuerdings durch Vögel verursacht, die die Maste und Isolatoren als willkommene Ruhepunkte aufsuchen. In Amerika haben sich diese Störungen in einem der-

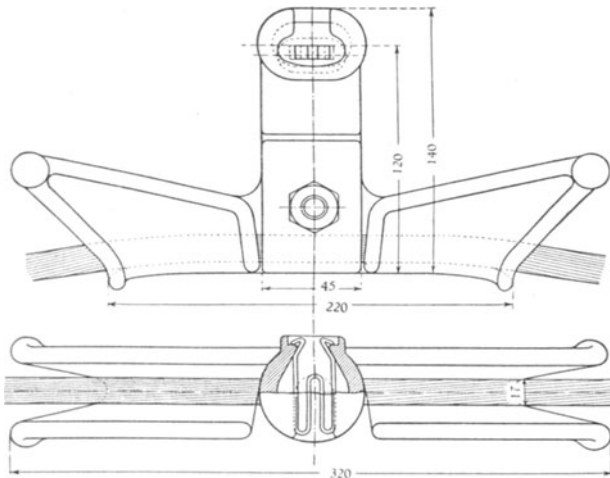


Abb. 15. Verlängerte Hängeklemme zur Vergrößerung des Abstandes zwischen Leitung und Traverse.

artigen Maße gezeigt, besonders auffällig an der 220 kV-Leitung der Süd-Kalifornischen Edisongesellschaft, daß man dort direkt von einer „Vogel“theorie spricht¹⁾. Einerseits überziehen sich nämlich die Isolatorenketten mit einer dicken Kotschicht, so daß die Überschlagsspannung herabgesetzt wird, andererseits aber überbrücken auch im Augenblick des Herabfallens die Exkremente die Isolatoren, besonders bei seitlichem Wind, so daß Überschläge die Folge sind. Man war gezwungen, sämtliche Traversen in dem betreffenden Gebiet mit Vogelschutzeinrichtungen zu versehen, die sich sehr gut bewährt haben. Auch in Deutschland sind der-

¹⁾ J.A.J.E.E. 1925, S. 1211.

artige Störungen bekannt geworden, allerdings mehr bei Einführungsisolatoren in Schalthäusern. Bei Mittelspannungsnetzen treten dagegen häufig Überschläge ein, die durch ruhende oder aufliegende Vögel (in Deutschland hauptsächlich Stare) verursacht werden, und zwar dann, wenn der Zwischenraum zwischen Leitung und Stütze bzw. Traverse zu klein ist. Besonders gefährdet sind hierbei die wagerechthängenden Abspannisolatoren. Auch die Lichtbogenhörer können gefährlich wirken, wenn sie nicht genügend flach gebogen sind. Zur Vergrößerung des lichten Abstandes verwendet man bei Hängeketten zweckmäßig längere Hängeklemmen (Abb. 15).

C. Alterserscheinungen an Porzellanisolatoren.

Die Erscheinung des „Alterns“ ist in den letzten Jahren in der Werkstoffkunde sehr oft und eingehend behandelt worden, allerdings in der Hauptsache nur in mechanischer Hinsicht. Man versteht unter Altern das allmähliche Nachlassen der mechanischen oder auch elektrischen Festigkeit, das bis zur vollständigen Zerstörung führen kann, ohne daß der allgemein als zulässig angenommene Belastungsgrenzwert auch nur annähernd erreicht worden ist. Neben der eigentlichen Belastungsstärke spielt demnach die Zeit der Beanspruchung eine ausschlaggebende Rolle, so daß die Lebensdauer eines Konstruktionsmaterials bei gleicher Art der Beanspruchung anscheinend gegeben ist durch das Produkt: Beanspruchungshöhe mal Zeit, d. h. daß der Werkstoff kurzdauernden Beanspruchungen gegenüber viel widerstandsfähiger ist als gegen Dauerbeanspruchungen. Die Kurve der Zerstörungsbelastung über der Zeit verläuft demnach nach einer Hyperbelfunktion.

Die Ursachen des Alterns sind Beanspruchungen aller möglichen Art. Es ist selbstverständlich unmöglich, eine einzige Alterungsursache (z. B. Zugbelastung) allein wirken zu lassen. Außer mechanischen, z. B. Biegungszusatzlasten, sind stets thermische Beanspruchungen vorhanden.

Daß Alterungserscheinungen früher oder später bei jedem Material auftreten, ist als sicher anzunehmen; jedoch ist es denkbar, daß die Änderung des Materials so lange Zeit beansprucht, daß sie praktisch in endlicher Zeit nicht nachweisbar ist. Bei vielen Stoffen dagegen, z. B. bei einigen Eisen- und Stahllarten,

ist ein Nachlassen in der Festigkeit schon nach verhältnismäßig kurzer Zeit festzustellen.

Bei Porzellan ist die Alterung noch ungeklärt, weil viele Isolatoren Schäden früher einfach als Alterungserscheinungen bezeichnet worden sind, trotzdem sie damit nicht das geringste zu tun haben, z. B. die durch die Treibwirkung des Kittes erfolgten Risse. Diese Risse machen sich zwar auch erst nach einiger Zeit bemerkbar, aber sie werden nicht durch dauernde, weit unter der Beanspruchungsgrenze liegende Belastungen verursacht, sondern infolge der großen Ausdehnung bzw. Unelastizität des Zementes erreichen die auf das Porzellan ausgeübten Druckkräfte Werte, die den normalen Druckfestigkeiten nahekommen.

Dagegen wird in verschiedenen amerikanischen Arbeiten mitgeteilt, daß die untersuchten Isolatoren allmählich unter dem Einfluß von elektrischen¹⁾ und mechanischen²⁾ Beanspruchungen ihr Gefüge geändert, und daß sich mikroskopisch kleine Kanäle gebildet haben. Nach Peaslee³⁾ ergibt sich sogar bei mikroskopischer Betrachtung des Porzellans, daß die in Kristallform in einem gläsernen Magma eingebetteten Quarzteilchen durch Druck und Wechsellastspannung in vibrierende Bewegung versetzt werden. Dadurch will man erklären, daß bei gleichzeitiger elektrischer und mechanischer Beanspruchung frühzeitige Durchschläge erfolgten. Diese bei amerikanischen Porzellanen angegebene allmähliche Verschlechterung des Porzellans müßte als ausgesprochene Alterserscheinung betrachtet werden.

Die im folgenden mitgeteilten Versuche erstreckten sich auf die Feststellung, ob eine derartige Alterung auch bei deutschen Porzellanen vorhanden ist. Dabei wurde eine etwaige Gefügeänderung durch Feststellung der mechanischen und elektrischen Festigkeit untersucht, während eine mikroskopische Beobachtung des Gefüges nicht stattfand.

Aus naheliegenden Gründen konnten hierbei nur die Erzeugnisse der Porzellanfabrik Rosenthal verwendet werden, doch werden die Versuchsergebnisse auch bei den anderen deutschen Porzellanen im wesentlichen dieselben sein, da die einzelnen Massen nicht grundsätzlich voneinander verschieden sind.

¹⁾ Peaslee: Proc. A.J.E.E. 1916, S. 1237. ETZ. 1918, S. 169.

²⁾ Bang: Proc. A.J.E.E. 1920, S. 1425. ETZ. 1920, S. 15.

³⁾ Peaslee: J.A.J.E.E. 1920, S. 445. ETZ. 1920, S. 734.

1. Untersuchung von ausgebauten Stütz-Isolatoren.

Die Versuche wurden in der Weise durchgeführt, daß jedesmal 5—7 ausgebaute Isolatoren derselben Bauart und Lieferung gemessen wurden. Darauf wurden Isolatoren derselben Lieferung, die nicht eingebaut gewesen waren und nur in trockenen Räumen mit geringen Temperaturschwankungen gelagert hatten, in gleicher Weise untersucht.

a) **Messung des Verlustwinkels und der Öldurchschlagsspannung.** Eine Änderung des Gefüges, wie sie nach den angeführten amerikanischen Berichten im Laufe der Zeit eintreten soll, muß sich durch eine Änderung des Verhältnisses: Wirkstrom durch Blindstrom, also des Verlustwinkels, bemerkbar machen.

Die Isolatoren wurden zu den Versuchen mit dem Kopf in Wasser getaucht, an das die Hochspannung gelegt wurde. Das Stützenloch wurde ebenfalls mit gutleitendem Wasser gefüllt und zu dem Vibrationsgalvanometer geführt. Der Oberflächenstrom wurde durch einen Drahring abgefangen¹⁾.

Der größte Teil der Isolatoren wurde ferner unter Öl durchschlagen, wobei die Spannung um 1 kV je Sekunde gesteigert wurde. In der letzten Spalte der Zahlentafel 2 sind die dabei erreichten Durchschlagsspannungen eingetragen.

So regellos die Versuchswerte liegen, so kann es doch trotz der verhältnismäßig geringen Zahl von Versuchsstücken (im ganzen 8 Serien zu je 5—7 Stück) gesagt werden, daß eine allgemeine Verschlechterung der elektrischen Festigkeit nicht eingetreten ist. Allerdings sind Stützisolatoren zu diesen Versuchen weniger als Kettenisolatoren geeignet, weil die Elektroden niemals genau in derselben Weise angebracht werden können, so daß die Versuchswerte stets stärker streuen. Besonders tritt dies bei den zementierten Isolatoren in die Erscheinung, bei denen wegen der stets etwas ungleichmäßigen Zementschicht einzelne Isolatoren unter starker mechanischer Spannung stehen, so daß die Öldurchschlagsspannungen außerordentlich schwanken.

Jedenfalls aber ist die Durchschlagsspannung von den Isolatoren, die über 10 Jahre im Betrieb waren, nicht kleiner als die der unbelasteten Isolatoren. Das gilt selbstverständlich auch von den Isolatoren, die kürzere Zeit unter Spannung eingebaut waren. (Nicht in die Tabelle eingetragen.)

¹⁾ Draeger, K.: ETZ. 1925, S. 683. Rosenthal-Mittlg. Heft 7.

Zahlentafel 2.
 $P = 25 \text{ kV}$; $f = 48,5 \text{ Per./Sek}$; $t = 15^\circ \text{C}$.

Isolatorform	Einbauzeit Jahre	Gefüge	Normale Betriebsspannung kV	tang d	Durchschlagsspannung unter Öl in kV
Stützisolator 906 A und B zusammenglasiert . . .	12	grobkörnig	15000	0,050	157
				0,075	—
				0,092	139
				0,100	184 ¹⁾
				0,088	145
					Mittelwert: 156
wie oben	0	grobkörnig	—	0,070	158
				0,087	151
				0,082	172 ¹⁾
				0,090	155
				0,100	148
				0,105	147
					Mittelwert: 155
Stützisolator 755 zementiert	11	grobkörnig	15000	0,013	147
				0,031	110
				0,015	127
					Mittelwert: 127
wie oben	0	grobkörnig	—	0,014	137
				0,022	—
				0,023	106
				0,032	116
					Mittelwert: 120
Stützisolator 756, zementiert	10	feinkörnig muschlig	15000	0,010	105
				0,030	97 ²⁾
				0,014	100
				0,012	115
					Mittelwert: 104
wie oben	0	desgl.	—	0,014	110
				0,018	119
				0,015	100
					Mittelwert: 110

Auch die Ergebnisse der Verlustwinkelmessungen lassen keinesfalls auf eine allgemeine Verschlechterung schließen. Die Mit-

¹⁾ Durchschlag durch Hülse und Schirm.

²⁾ Durchschlag durch Hülse, Oberteil nicht durchschlagen.

telwerte der Verlustwinkel sind in beiden Fällen annähernd dieselben, in beiden Fällen kommen aber auch ausnahmsweise hohe Verlustwinkel vor.

Es ist dabei zu beachten, daß besonders von den mit Zement gekitteten Isolatoren ein großer Teil bereits auf der Leitung infolge der Treibwirkung des Zementes zerstört worden ist. Wie schon dargelegt, kann diese Erscheinung aber nicht als Altern des Porzellans selbst angesehen werden. Bemerkenswert ist noch, daß an den in Räumen geringer Feuchtigkeit und kleiner Temperaturschwankungen eingelagerten Isolatoren kein einziges Stück Kittrisse aufwies, während von den aus derselben Lieferung stammenden eingebauten Isolatoren ein großer Teil bereits auf der Leitung ausgefallen war.

b) **Stoßprüfung.** Sämtliche Stützisolatoren wurden der Gleichstromstoßprüfung unterworfen, wobei zwischen Isolator und Zündfunkenstrecke eine 20 m lange Leitung mit einem Wellenwiderstand von etwa 400 Ohm eingeschaltet war.

Die Ergebnisse zeigt Zahlentafel 3.

Zahlentafel 3.

Isolatorform	Anzahl der geprüften Isolat.		Spannung am Isol. kV maximal	Schlagzahl	Ausfall		Überschlagspannung bei Wechselstrom in kV max
	ausgebaut	nicht eingebaut			ausgebaut	nicht eingebaut	
Stützisolator 906 A bzw. B	12	8	150	50	0	0	106
			175	100	0	1	
Stützisolator 755 . .	13	10	150	50	0	0	113
			175	100	1	0	
Stützisolator 756 . .	17	5	150	50	0	0	106
			175	100	0	1	

Nach der Stoßprüfung wurden sämtliche Isolatoren der Wechselstromprüfung bei 70 bzw. 75 kV eff. unterzogen. Es erfolgte kein Durchschlag.

Stoßprüfung und Wechselstromprüfung ergeben dasselbe Bild wie die Durchschlagsspannung unter Öl, d. h. die schon lange Zeit der elektrischen Spannung, der mechanischen Belastung und den verschiedensten thermischen Einflüssen unterworfenen Isolatoren verhalten sich nicht nachweisbar schlechter als die unbelasteten.

2. Messung an normalen Ketten-Isolatoren.

Ausgebaute Ketten-Isolatoren mit 10jähriger Betriebsbelastung standen nicht zur Verfügung, daher wurde versucht, an neuen Isolatoren künstlich Alterungserscheinungen hervorzurufen. Da es im wesentlichen auf das Produkt Belastungshöhe mal Zeit ankommt, kann man annähernd dieselbe Gesamtwirkung erreichen, wenn man die Belastung größer und die Zeit kleiner wählt.

a) **Mechanische Zugbelastung bei gleichzeitiger Wechselstromprüfung.** Die Isolatoren wurden in die Zerreißmaschine eingespannt und gleichzeitig mit einer Spannung von 70 kV geprüft. Die Belastung wurde von 3000 kg beginnend um je 1000 kg gesteigert, wobei jede Stufe 1 Minute lang innegehalten wurde.

Zahlentafel 4.

$$P = 70 \text{ kV}; f = 48,5 \text{ Per./Sek.}$$

Isolatorform	Anzahl der Isolatoren	Zahl der Durchschläge	Durchschlagsbelastung kg	Höchstbelastung kg	Bemerkungen
Kegelkopf-Isolator Nr. 10957	9	0	—	6000—7900	mechanisch u. elektr. gut
desgl.	1	0	—	7900	Bolzen gerissen, elektr. gut
desgl.	15	1	8000	7000—8000	1 Durchschlag
Kegelkopf-Abspann- isolator Nr. 10975	5	1	7500	7000—7600	1 Durchschlag
desgl.	4	0	—	8000—9200	1 Bolzen gerissen, elektr. gut
Kappen-Abspann- isolator Nr. 10289 .	6	0	—	6500	Bruch des Porzellans an einem Isol., alle übrigen elektr. gut

Bei dieser Art der Prüfung erfolgten also nur ausnahmsweise Durchschläge, wobei die Durchschlagsbelastung wenig unterhalb der Bruchbelastung lag. I. a. fällt der Durchschlag mit dem endgültigen Bruch zusammen, d. h. der Isolator hält bis zum Bruch die volle elektrische Spannung aus. Die Prüfung wurde nun so vorgenommen, daß der Isolator in gleicher Weise wie zuvor von 1000 zu 1000 kg belastet und hinterher 15 Minuten lang im Prüfbottich mit Wechselstrom geprüft wurde.

Vergleicht man die Ergebnisse von Zahlentafel 4 und 5, so sieht man, daß auch bei gleichzeitiger elektrischer und mechanischer

Zahlentafel 5.
 $P = 70 \text{ kV}; f = 48,5 \text{ Per./Sek.}$

Isolatorform	Anzahl der Isolatoren	Zahl der Durchschläge	Durchschlagsbelastung kg	Höchstbelastung kg	Bemerkungen
Kegelkopf-Isolator Nr. 10957	10	0	—	4000	je 5 min. lang belastet 1 Durchschlag
	12	0	—	3000	
	11	1	8000	8000	
	10	1	7000	7000	
	2	0	—	8000	
Kegelkopf-Hängeisolator 10860	27	0	—	4000	15 Min. lang belastet, elektrisch und mechanisch gut
	14	0	—	4000	
	13	0	—	5800—6600	
Kegelkopf-Abspannisolator 10975	5	0	—	3200	
	15	0	—	4800	
Kappen-Hängeisolator 10288	10	0	—	2000	elektr. u. mech. gut elektr. u. mech. gut elektr. u. mech. gut
	3	0	—	2800	
	3	0	—	3800	
Kappen-Abspannisolator 10289	10	0	—	3000	elektr. u. mech. gut elektr. u. mech. gut
	3	0	—	4000	
Kegelkopf-Isolator 10957	9	1	7000	6000—7900	1 Durchschlag nach 1 Min.

Prüfung eine elektrische Minderung nur ausnahmsweise eintritt. Durchschlags- und Bruchbelastung fallen annähernd zusammen. Zunächst kann man daraus schließen, daß im Gegensatz zum amerikanischen Porzellan durch gleichzeitige elektrische und mechanische Belastung die elektrische Festigkeit des untersuchten Porzellans keinesfalls mehr herabgesetzt wird, als wenn die Prüfungen nacheinander vorgenommen werden, d. h. ein merklich elastisches Gefüge, das eine Herabsetzung der Durchschlagsfestigkeit während der mechanischen Belastung zur Folge haben müßte, ist nicht vorhanden. Zu demselben Ergebnis kommt man durch die empfindlicheren Verlustwinkelmessungen¹⁾.

Achtet man bei der kombinierten Prüfung auf das im Porzellankörper auftretende Geräusch, so kann man fast einwandfrei angeben, bei welcher Belastung der Isolator durchschlagen wird.

¹⁾ Vgl. Anm. S. 21.

Die Rißbildung macht sich durch ein charakteristisches Knistern bemerkbar. Diese Risse gehen nun meistens nicht von Kappe zu Klöppel, so daß ein sofortiger Durchschlag nicht erfolgt, vielmehr bahnt sich die Spannung erst nach längerer Zeit einen Weg. Durch die Verlustwinkelmessung ist festgestellt, daß hierzu unter Umständen bis 15 Min. erforderlich sind. Der Durchbruch erfolgt dann wahrscheinlich in der Weise, daß zunächst ein kleiner Riß von der Länge eines Millimeters entsteht. Die Spannung reicht aber noch nicht hin, um das übriggebliebene gesunde Stück zu durchschlagen. Dagegen ist der entstandene Kanal von Glimmlicht erfüllt, so daß die Elektroden scheinbar genähert werden, dadurch geht an dieser Stelle ein größerer Strom durch das Porzellan. Die durch die größeren dielektrischen Verluste sowie die Glimmentladungen entstehende Erwärmung führt dann allmählich zum Durchschlag.

Durch Messung des Verlustwinkels bei gleichzeitiger mechanischer Belastung wurde früher festgestellt, daß beim Auftreten des knisternden Geräusches im Porzellan der Verlustwinkel sofort stark ansteigt, und daß bei genügend langer Spannungseinwirkung der Durchschlag ohne weitere Belastungssteigerung erfolgt.

Hieraus sowie auch aus den zum Teil mit Zeitangaben versehenen Versuchsergebnissen der Zahlentafel 5 folgt, daß die Zeitdauer der mechanischen Belastung¹⁾ ohne Einfluß auf den Durchschlag zu sein scheint, während die Zeitdauer der elektrischen Prüfung eine gewisse Rolle spielt. Daß bei wiederholter mechanischer Belastung an den in ausgeprägtem Maße elektrische Minderung zeigenden Isolatoren mehr Durchschläge eintreten als bei einmaliger Belastung, steht hiermit nicht im Widerspruch; denn bei Lagenänderung des Isolators ist die Wahrscheinlichkeit, daß einmal die ungünstigste Auflage erreicht wird, größer als bei einmaliger Belastungssteigerung. Ist die spezifische Belastung an irgendeiner Stelle des Porzellans zu groß geworden, etwa infolge einer Unebenheit im Porzellan oder der Armatur, so wird an dieser Stelle das Porzellan zum Teil zertrümmert und meistens auch nach einer gewissen Zeit elektrisch durchschlagen. Gerade

¹⁾ 12 Kegelkopfisolatoren 10957 wurden einer Dauerbelastung unterzogen. Die Isolatoren wurden zunächst etwa 3 Monate mit 4000 kg belastet und stehen jetzt seit etwa 6 Monaten unter einer Dauerbelastung von 5000 kg; ein elektrischer Durchschlag erfolgte bisher nicht.

durch diese Zertrümmerung aber wird in den meisten Fällen die spezifische Belastung vergleichmäßig, so daß der Vollbruch unter Umständen erst bei weit höheren Belastungen einsetzt, nämlich dann, wenn die spezifische Belastung an allen Auflagestellen die Bruchfestigkeit überschreitet. Bei ungleichmäßiger Lastübertragung (Punktbelastung) erhält man also trotz hoher Vollbruchfestigkeit schon bei niedrigen Belastungen elektrische Durchschläge.

b) Mechanische Zugbelastung bei gleichzeitiger elektrischer Stoßprüfung. Bei gleichzeitiger mechanischer und Wechselstromprüfung wird, wie aus dem vorigen Abschnitt hervorgeht, bis zum Bruch fast ausnahmslos die volle Spannung ausgehalten, d. h. eine elektrische Minderung tritt bei den untersuchten Porzellanen im allgemeinen nicht ein, unter der Voraussetzung, daß die Lastübertragung durch geeignete Konstruktion der Zugorgane gleichmäßig erfolgte. Um das Verhalten der Isolatoren bei gleichzeitiger Gleichstromstoßbeanspruchung zu untersuchen, wurde der Isolator, an beiden Seiten isoliert, in die Zerreißmaschine gespannt. Die Zuleitungen von der Zündfunkenstrecke zum Isolator waren nicht gleich lang, sondern betragen 18 bzw. 50 Meter. Es ist daher zu erwarten, daß neben der Stoßbeanspruchung noch hochfrequente Schwingungen den Isolator belasten. Die Spannung wurde am Isolator mit einer Kugelfunkenstrecke gemessen. Um einen größeren Ausfall und damit eine bessere Vergleichsmöglichkeit zu erhalten, wurde die Spannung höher gewählt, als sie nach den Richtlinien des Ausschusses für den elektrischen Sicherheitsgrad (maximale Gleichstromstoßspannung gleich dem doppelten Wert der effektiven Wechselstromprüfspannung) vereinbart ist. Es treten also bei diesen hohen Spannungen auch schon Durchschläge bei einwandfreiem Material auf. Die mechanische Belastung wurde von 1000 zu 1000 kg gesteigert, und bei jeder Belastung wurden 50 Schläge auf den Isolator gegeben. Zum Vergleich wurde eine Anzahl Isolatoren mit der gleichen Schlagzahl und Spannung, aber ohne Belastung geprüft. Es wurden in der Hauptsache Isolatoren aus einer feinkörnigen glasigen Masse verwendet, die mechanisch schwächer und empfindlicher gegen Stoßbeanspruchung ist.

Die Zahlentafel zeigt das interessante Ergebnis, daß im Gegensatz zu der Beanspruchung mit sinusförmiger Wechselspannung,

Zahlentafel 6.

Isolatorform	Anzahl der Isolatoren	Stoßspannung kV maximal	Schlagzahl	Zahl der Durchschläge	Zahl der Durchschläge ‰	Mittlere Be- lastung beim Durchschlag	Mittlere Bruch- belastung
						kg	kg
Kegelkopf-Isolator 10860 — feinkörni- ges, muschliges Ge- füge	10	240	300	6	60	4000	4500
	6	240	300	2	30	0	—
Kegelkopf-Isolator 10957 — grobkör- niges Gefüge . .	18	240	500	6	33	8000	9000
	10	240	500	2	20	0	—
Untra-Isolator 10438 feinkörnig., musch- liches Gefüge . .	5	240	300	2	40	4500	5000
	4	240	300	1	25	0	—

bei Stoßspannung mit gleichzeitiger mechanischer Belastung eine gewisse elektrische Minderung vorhanden ist, wenn auch erst bei Belastungen, die etwa 10‰ unter der Bruchbelastung liegen. Wenn auch von den angegebenen Durchschlägen, wie jedesmal die zweite Spalte zeigt, ein Teil ohne mechanische Beanspruchung bei der verwendeten hohen Stoßspannung durchschlägt, so ergibt sich doch einwandfrei ein zusätzlicher Ausfall bei hoher Belastung, wie aus der mittleren Durchschlagsbelastung hervorgeht. Dadurch wird die Ansicht über die Wirkung der Stoßspannung bestätigt, daß nämlich neben der elektrischen Beanspruchung auch eine rein mechanische Stoßbelastung vorhanden ist, die den Einfluß der mechanischen Belastung auf die Rißbildung begünstigt. Bei Isolatoren mit Punktbelastung wird daher der Ausfall bei gleichzeitiger mechanischer und Stoßbeanspruchung sehr hoch sein. Der Durchschlag erfolgt weiterhin bei Stoßspannungen meistens beim ersten Schlag nach der Belastungssteigerung, während bei Wechselspannung erst allmählich das Dielektrikum durchbohrt wird. In jedem Falle ist aber die Voraussetzung zum Durchschlag eine vorhergehende örtliche Rißbildung infolge zu hoher spezifischer Belastung des Porzellans an irgendeiner unebenen Stelle, während das Porzellangefüge in seiner Gesamtheit durch hohe mechanische Belastungen keine physikalische Änderung erleidet.

c) **Einfluß von Temperaturwechseln.** Nach Versuchen von Ryan¹⁾, die sich allerdings nur auf ältere amerikanische, bei niedriger Temperatur gebrannte Isolatoren beziehen, ist der größte Ausfall auf Temperaturwechsel zurückzuführen. Ryan unterwarf dabei die Isolatoren nur den natürlichen Temperaturschwankungen. Bekanntlich sind vom VDE. Wärmesturzprüfungen vorgeschrieben, die gestatten, in kürzerer Zeit die Widerstandsfähigkeit von Isolatoren gegen scharfe Temperaturwechsel zu untersuchen, indem die Isolatoren plötzlich auf Temperaturen bis zu 90° C erwärmt und dann wieder plötzlich auf 15° C abgekühlt werden. Die dadurch entstehenden bzw. ausgelösten inneren Spannungen können zum Zerspringen der Isolatoren führen; bekanntlich werden Glas-Isolatoren auch bei kleineren

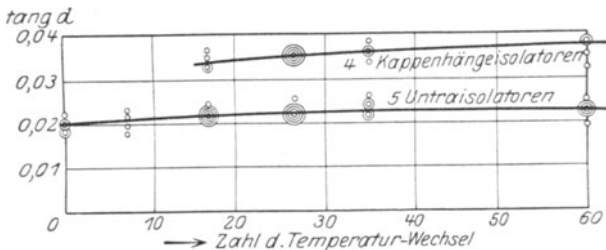


Abb. 16. Einfluß von Temperaturwechseln auf den Verlustwinkel bei Kettenisolatoren.

Temperaturunterschieden fast ausnahmslos beim ersten Wechsel zerstört. Aber diese Erscheinung kann man nicht unbedingt als Altern bezeichnen, da eine Gefügeänderung nicht damit verbunden zu sein braucht.

Um letzteres festzustellen, wurden Kappen-Isolatoren bis zu 60mal einem Temperaturwechsel von 95° auf 13° C und umgekehrt ausgesetzt. Es wurden dabei von Zeit zu Zeit die Verlustwinkel sowie zum Schluß die Öldurchschlagsspannungen bestimmt. In Abb. 16 sind die Verlustwinkel über der Zahl der Tauchprüfungen dargestellt.

Zahlentafel 7 zeigt weitere Ergebnisse.

Abb. 16 sowie Zahlentafel 7 zeigen, daß eine allmähliche Verschlechterung selbst bei 60 scharfen Temperaturstürzen nicht

¹⁾ Ryan: *Elt. World* 1920, S. 1479. *ETZ.* 1920, S. 696. *Benham: ETZ.* 1924, S. 959. *J.A.J.E.E.* 1924, S. 1257.

Zahlentafel 7.

Isolatorform	Zahl der Isol.	Zahl der Temperaturwechsel	Ausfall	Durchschlags- spannungen			Bemerkungen
				mittlere kV	größte kV	kleinste kV	
Kappen-Hängeisolator Nr. 10288, feinkörniges, muschliges Gefüge	10	60	0	135	147	113	An einem Isolator sprang beim 17. Wechsel der Teller zur Hälfte ab
Kappen-Hängeisolator Nr. 10288, grobkörniges Gefüge. . .	10	60	0	139	145	120	
Mittelwert ohne Tauchprüfung		0		139			
Untra-Isolator Nr. 10438, feinkörniges Gefüge . . .	8	60	0	163	186	132	
Mittelwert ohne Tauchprüfung		0		170			
Kegelkopf-Isolator Nr. 10860, feinkörniges, muschliges Gefüge	5	38	0	130	133	127	
Mittelwert ohne Tauchprüfung		0		130			
Kegelkopf-Isolator Nr. 10860, grobkörniges Gefüge . . .	5	38	0	132	148	118	
Mittelwert ohne Tauchprüfung		0		130			
Untra-Isolator Nr. 10518, grobkörniges Gefüge . . .	65	20	0	185	210	140	

stattfindet. Dagegen zersprang z. B. beim 17. Temperaturwechsel an einem zementierten Kappen-Hänge-Isolator der Porzellan-schirm, während ein Durchschlag am Kopf bei der elektrischen Prüfung nicht eintrat. Tatsächlich kommen bei dieser feinkörnigen, glasigen Masse vereinzelt Beschädigungen bei schroffen Temperaturwechseln vor. Wie aber die Verlustwinkel-messung zeigt, kündigt sich diese Beschädigung nicht allmählich an, sondern die zum Bruch führende Materialspannung wird plötzlich ausgelöst. Eine ganz andere Ursache haben die bei Temperaturwechseln auftretenden Kopfrisse, die nicht an dem durch Spannungen gefährdetsten Punkt, also wo starke Massenänderungen vor-

¹⁾ Die Durchschlagsspannungen sind nur Relativ-, keine Absolutwerte, mit Ausnahme der Durchschlagsspannungen für die Untra-Isolatoren.

handen sind, auftreten. Diese Kopfrisse kann man nämlich auch bei sehr widerstandsfähigem Porzellan erhalten, und zwar dann, wenn man Zement mit starker Wärmedehnung verwendet. Ist die Wärmeausdehnung dieses Zementes größer als die des Porzellans, so entstehen bei plötzlicher Abkühlung derartig hohe Innendrucke, daß der Porzellankörper gesprengt wird. Bekanntlich treten auch bei jedem Gewitterregen Durchschläge an den betreffenden zementierten Isolatoren auf. Mit einer Änderung des Porzellangefüges durch Temperaturwechsel hat diese Erscheinung aber natürlich auch nichts zu tun.

3. Messung an Doppelkappen-Isolatoren.

Die wachsende Verbreitung der auf Zug beanspruchten Isolatoren zwingt dazu, das Porzellan auf eine etwaige mechanische Minderung bei dauernden starken mechanischen Belastungen zu untersuchen. Infolge der besonderen Bauart dieser Isolatoren ist die elektrische Feldstärke im Porzellan so gering, daß ein Durchschlag völlig ausgeschlossen ist. Die zu durchschlagende Luftstrecke ist beinahe ebenso lang wie der Weg durchs Porzellan. Die Wirkung des elektrischen Feldes kann also außer acht gelassen werden.

a) **Einfluß der Vorbelastung auf die Zerreißfestigkeit.** Am wichtigsten ist das Verhalten bei Zugbelastungen, wobei zu untersuchen ist, ob durch wiederholte Zugbelastung die mechanische Festigkeit nachläßt. Es wurden ferner länger dauernde Versuche vorgenommen, die in Zahlentafel 8 zusammengefaßt sind.

Zahlentafel 8.

Isolatorform	Anzahl der Isolatoren	Belastung in kg	Belastungsdauer in Stunden	Ausfall	Bemerkungen
Motor-Isolatoren Nr. 11150	20	5000	12		
		6000	60		
		7000	60	1	Isolator bei 6900 kg gerissen, schlecht eingegossen. Isolator liegt am Eisen d. Kappe an.
					1
		8000	60	3	Isolatoren beim Belasten gerissen bei 7700 kg bei 7900 kg, bei 8000 kg.

Die übriggebliebenen 15 Isolatoren wurden 50mal bis 7900 kg belastet und entlastet. Dabei erfolgte bei der achten Belastung der Bruch eines Metallklöppels (Porzellan gut). Bei der zwanzigsten Belastung wurde eine Kappe abgezogen (Porzellan gut). Die übriggebliebenen 13 Isolatoren wurden bis zum Bruch belastet, wobei jedesmal gleichzeitig 4 Isolatoren eingespannt waren, so daß beim Bruch des schwächsten Isolators die übrigen stoßweise von einer Belastung von 8000 bis 9000 kg auf 0 entlastet wurden. Die Reihenfolge der Isolatornummer gibt gleichzeitig die Lage des Isolators in der Zerreißmaschine an.

Zahlentafel 9.

Isolator-Nr.	Bruchbelastung kg	Bemerkungen
1, 2, 3, 4	8700	Nr. 2. Bruch an der unteren Klöppelkappe
1, 5, 3, 4	8800	Nr. 3. Bruch an der oberen Laschenkappe.
1, 5, 6, 4	8600	Nr. 5. Bruch an der oberen Laschenkappe.
1, 7, 6, 4	8400	Nr. 6. Bruch an der unteren Laschenkappe.
1, 7, 4, 8	7900	Nr. 7. Bruch an der unteren Klöppelkappe.
1, 9, 4, 8	8000	Nr. 9. Bruch an der oberen Laschenkappe.
1, 10, 4, 8	4900	Nr. 4. Bruch des Metallklöppels (Porzellan gut).
1, 10, 11, 8	8200	Nr. 1. Bruch an der unteren Laschenkappe.
13, 10, 11, 8	8100	Nr. 11. Bruch d. Metallklöppels (Porzellan gut)
13, 10, 12, 8	7900	Nr. 12. Bruch des Metallklöppels (Porzellan gut).
13, 10, 8	7800	Nr. 10. Bruch des Metallklöppels (Porzellan gut).
13, 8	8000	Nr. 13. Bruch des Metallklöppels (Porzellan gut).
8	8000	Nr. 8. Obere Laschenkappe aufgezogen (Porzellan gut).

In Zahlentafel 10 sind nochmals die maximalen Belastungen zusammengestellt, die jeder Isolator, ohne zu reißen, bei irgendeinem Versuch ausgehalten hat; ferner die Anzahl der Belastungssteigerungen bis in die Nähe der Bruchlast, schließlich die Bruchlast selbst.

Darnach liegt bei Isolator Nr. 1, der die größte Differenz aufweist, die Bruchlast etwa 7% unter der größten Belastung, während bei den übrigen Isolatoren die Differenz geringer ist. Berücksichtigt man, daß bei wiederholter Einspannung der Isolator stets eine andere Lage annimmt, so daß bei der verwendeten langen Bauart sehr leicht zusätzliche Biegungsbeanspruchungen auftreten

Zahlentafel 10.

Isolator-Nr.	Maximale Belastung kg	Zahl der Belastungssteigerungen	Bruchlast kg
1	8800	57	8200
2	8700	50	8700
3	8800	52	8800
4	8800	57	4900 ?
5	8800	52	8600
6	8600	52	8400
7	8400	52	7900
8	8200	59	8000 ?
9	8000	51	8000
10	8200	55	7800 ?
11	8200	52	8100 ?
12	8000	51	7900 ?
13	8100	54	8000 ?

können, so ergibt sich, daß eine mechanische Minderung in keinem Falle vorhanden ist, obwohl die Belastung mehr als 50mal bis nahe an die Bruchgrenze gesteigert wurde. Ferner ergibt sich, daß der außerordentlich heftige Entlastungsstoß, der bei Bruch eines Isolators die drei übrigen gleichzeitig eingespannten Isolatoren beansprucht, die Bruchfestigkeit nicht merklich herabsetzt.

Wie aus schon früheren Versuchen hervorgeht, liegt daher die „Fließgrenze“ beim Porzellan sehr nahe an der Bruchgrenze, wenn sie nicht überhaupt mit der Bruchgrenze zusammenfällt.

Sehr interessant ist das Verhalten der Eisenarmaturen und der Eingußlegierung. Die Ermüdungsgrenze des Eisenklöppels ist bei 8000 kg zweifellos schon überschritten, so daß bei wiederholter Belastung mehrfach der Klöppel schon bei sehr niedriger Belastung reißt (z. B. in Nr. 4, 8, 10, 13)¹⁾.

Um ein einwandfreies Bild durch Prüfung einer größeren Zahl von Isolatoren zu erhalten, wurden Abnahmeprüfungen zu diesen Untersuchungen verwendet. Ein großer Teil der Isolatoren wurde vor der Abnahme mit der Prüfspannung belastet und bei der Abnahme nochmals mit der gleichen Belastung durchgeprüft. Die Prüfbelastung betrug dabei etwa die Hälfte bis zwei Drittel der Bruchlast.

Die Zahlentafel 11, die die Untersuchung von mehr als 20000 Isolatoren umfaßt, bestätigt die an einer kleinen Anzahl durchgeführten und in Zahlentafel 10 angegebenen Versuche. Nicht

¹⁾ Neuerdings werden Motor-Isolatoren fast durchweg mit 2 Pfannkappen ausgeführt.

Zahlentafel 11.

Isolatorform	Abnahmetag	Zahl der untersucht. Isolatoren	Prüflast kg	Ausfall bei wieder- holter Belastung	Bruchlast der ausgefallenen Isolatoren kg
Motor-Isolator					
Nr. 11030 grün	20.—23. 4. 25	3000	4000	0	—
desgl.	26.—27. 5. 25	500	4000	0	—
desgl.	17.—18. 8. 25	350	4000	0	—
Motor-Isolator					
Nr. 11030 weiß	22. 10. 24	150	4000	1	bei 4000 kg Kappe ab- gez., Porzel- lan gut
desgl.	19. 12. 24	125	4300	0	—
Motor-Isolator					
Nr. 11150 weiß	20. 6. 25	4000	5000	1	4900
desgl.	25.—28. 6. 25	2000	4000	0	—
desgl.	8.—11. 6. 25	3000	4500	1	4500
desgl.	6. 8. 25	490	4300	1	4500
desgl.	17. 8. 25	250	4300	0	—
desgl.	31. 8.—4. 9. 25	3500	5000	2	4800
desgl. grün	20.—23. 4. 25	3300	4000	0	—

ein einziger Isolator ist bei einer Belastung gebrochen, die wesentlich unter der Vorprüfungslast liegt. Daß einige Isolatoren (etwa 0,03%) nochmals ausgefallen sind, erklärt sich, wie schon erwähnt, aus der verschiedenen manchmal mehr oder weniger günstigen Einspannung. Außerdem wurden die Versuche zum Teil auf verschiedenen Maschinen durchgeführt, wobei auf der mit Kurbeltrieb versehenen Maschine die Prüflast nicht immer genau eingestellt werden konnte. Selbstverständlich ist es dagegen möglich, daß bei Isolatoren, die mit 4000 kg vorgeprüft sind, auch bei 5000 bis 6000 und 7000 kg der eine oder der andere Isolator ausfällt, während die mittlere Bruchlast bei 8000 bis 9000 kg liegt. Es muß daher gefordert werden, daß die Motor-Isolatoren mit mindestens derjenigen Belastung als Prüflast bei der Abnahme gezogen werden, mit der sie nachher im ungünstigsten Fall auf der Leitung belastet werden können, wobei als obere Grenze für die Vorprüfungsbelastung die Fließgrenze der Leitungsseile zu setzen ist.

b) **Biegeversuche.** Die Isolatoren werden stets mehr oder weniger auch auf Biegung beansprucht. Das gilt sowohl für die in der Hauptsache auf Druck beanspruchten Ketten-Isolatoren, als auch für die in der Hauptsache auf Zug beanspruchten Motor-Isolatoren. Vor allen Dingen bei letzteren können die Biegungs-

beanspruchungen unzulässig hohe Werte erreichen, die zum Bruch des Isolators führen. Aus der Art des Bruches kann man im allgemeinen auf die Art der Beanspruchung schließen.

Die Biegefestigkeit des Porzellans liegt für die Form der Motor-Isolatoren zwischen 450 und 600 kg/cm². Bleibt man genügend weit unterhalb dieser Werte, so kann man selbstverständlich auch das Porzellan ohne weiteres auf Biegung beanspruchen, was vor allen Dingen bei Bahn-Isolatoren erwünscht ist.

Zahlentafel 12.

Isolatorform und Zahl	Mittlerer Querschnitt cm ²	Dauerbiegebelastung kg	Zeitdauer der Belastung in Stunden	Bruchbelastung kg	Spezifische Biegefestigkeit kg/cm ²
4 × 11150	44	550	5	565	470
2 × 11134	44	600	5	730	480
2 × 11134	44	570	5 × 2 Min.	—	—
		650	5 × 2 Min.	—	—
		720	5 × 2 Min.	728	470

An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, daß bei schlechtem Bleieinguß des Isolators unter Umständen ein allmähliches Nachlassen der Festigkeit mit der Zeit vorgetäuscht wird. Der zunächst zentrisch in der Kappe sitzende Isolator wird bei stärkerer Belastung nach der vom Blei freien Seite der Kappe gedrückt, bis schließlich das Porzellan direkt am Eisen anliegt und zu starke Biegungsbeanspruchungen auftreten, die den Bruch herbeiführen.

c) **Einfluß von Temperaturwechseln.** Zur Vornahme dieser Versuche wurden wiederum die Abnahmeprüfungen zur Hilfe genommen. Die Isolatoren wurden nach der Wärmesturzprobe teils mit der Prüflast nachgeprüft, teils bis zum Bruch belastet.

Zahlentafel 13.

Isolatorbezeichnung	Anzahl der Isolatoren	Anzahl der Temperaturwechsel	Temperaturunterschied ° C	Prüfbelastung in kg	Ausfall	Bruchlast in kg
Motor-Isolat. 11030 grün	12	3	70	4000 ¹⁾	—	—
Motor-Isolat. 11030 grün	12	3	75	4000	1	4000
Motor-Isolat. 11150 weiß	10	25	70	4800	0	—
desgl.	50	3	74	5000	0	—
desgl.	15	25	80	4800	0	8300
desgl.	60	3	75	5000	0	—

1) Die Isolatoren wurden in heißem Zustand geprüft.

Zusammenfassung.

Aus den Versuchen ergibt sich, daß eine gleichmäßige Änderung der Struktur („Altern“) bei den untersuchten Porzellanen nicht nachweisbar ist, daß vielmehr fast sämtliche Isolatoren sowohl ihre elektrischen, als auch ihre mechanischen Eigenschaften bis kurz unterhalb der normalen Zerstörungsgrenze beibehalten, während bei einem geringen Bruchteil der untersuchten Isolatoren bei übermäßiger mechanischer Beanspruchung der elektrische Durchschlag erfolgte, dagegen aber die mechanische Festigkeit nicht merklich geändert wurde.

Alle Beschädigungen, Durchschläge usw. werden durch äußere Einflüsse verursacht. Gelingt es, diese Ursachen der Porzellanschäden durch geeignete Bindemittel und durch die der Eigenheit der Porzellanmassen angepaßte Formgebung zu beseitigen, so ist die Lebensdauer der Hartporzellanisolatoren sehr hoch.
