

Fremdschichtprobleme auf Freileitungsisolatoren in unmittelbarer Nähe von Autobahnen

Von W. Schmidt, Baden, und F. Schwab, Olten

621.315.1:621.3.015.51:621.43.019.9

Durch die Abgase der Verbrennungsmotoren können sich im Winter in Verbindung mit dem auf Autobahnen verwendeten Antifrier-Streugut Sulfate bilden, die in einem grob abgeschätzten Einflussbereich die Isolationsfähigkeit von Isolatoren u. U. bis zum Überschlag herabsetzen. Laboruntersuchungen bestätigten die in der Praxis gefundenen Leitungsausfälle durch Fremdschichtablagerungen. Gegenmassnahmen werden diskutiert.

En hiver, conjointement avec des granulés antigel répandus sur les chaussées des auto-roues, les gaz d'échappement de moteurs à explosion peuvent former des sulfates qui se déposent sur les isolateurs de lignes aériennes, dont ils réduisent le pouvoir isolant à tel point que des contournements risquent parfois de se produire. Des investigations en laboratoire ont confirmé que des pannes constatées en pratique étaient dues à des encrassements d'isolateurs. Des précautions pour l'éviter sont examinées.

1. Einleitung

Bis heute sind die Isolationen von Freileitungen und Apparaten in der Schweiz, mit wenigen örtlichen Ausnahmen, im grossen und ganzen von betriebsstörenden Fremdschichteinflüssen verschont geblieben. Neuerdings zeigte es sich aber, dass der intensive Verkehr auf Autobahnen gewisse Schwierigkeiten in bezug auf die Verschmutzung von Freileitungsisolatoren bringen kann, sofern die Masten in unmittelbarer Nähe der Autobahn stehen.

2. Der Einfluss von Autobahnen

Die Probleme, die bei dichtem Verkehr aus den Autoabgasen entstehen, sind allgemein bekannt. Der Verbrennungsmotor gibt neben Stickstoff, Wasserstoff und Wasserdampf feste und gasförmige Blei-, Kohlenstoff- und Schwefelverbindungen an die Umgebung ab. Der grösste Anteil an den Abgasen fällt mit ca. 80 % auf den aus der Ansaugluft stammenden Stickstoff (N_2); an nächster Stelle steht das für Menschen und Pflanzen schädliche Kohlenoxyd (CO), das von ca. 8 % im Leerlauf während der Fahrt auf ca. ein Gewichtsprozent absinkt.

Für die Verschmutzung von Isolationen sind die Schwefelverbindungen besonders gefährlich, von denen in erster Linie gasförmig das Schwefeldioxyd (SO_2) in Erscheinung tritt. In den Abgasen der Benzinmotoren findet man nur zwischen 0...0,1 Gewichtsprozenten SO_2 , hingegen produzieren die Dieselmotoren 0,3...0,5 Gewichtsprozent Schwefeldioxyd.

Ein eigentliches Fremdschichtproblem kann für Isolatoren im Winter entstehen. In der kälteren Jahreszeit wird die Fahrbahn der Autobahnen stark gesalzen. Da das Kochsalz ($NaCl$) nur bis ca. $-7^\circ C$ als Antifriermittel wirksam ist und bei tieferen Temperaturen mit dem Wasser zusammen gefriert, muss dem Streusalz bei Temperaturen unter $-7^\circ C$ Calcium (Ca) beigemischt werden. Je nach Mischverhältnis zwischen $NaCl$ und Ca kann somit ein Gefrieren der Fahrbahn bis zu Temperaturen von $-45^\circ C$ verhindert werden.

Bei feuchter Witterung verbindet sich die im Regen oder im Schneeschmelzwasser gelöste Salz-Calcium-Mischung des Streugutes mit dem Schwefeldioxyd der Autoabgase. Es bilden sich einerseits Calciumsulfat ($CaSO_4 + 2 H_2O$), (bekannt unter der handelsüblichen Benennung Gips) und andererseits Natriumsulfat ($Na_2SO_4 + 10 H_2O$), (handelsüblich Glauber-

salz benannt). Durch die Luftdurchwirbelung, die wegen den hohen Geschwindigkeiten der Fahrzeuge auf Autobahnen höher als auf gewöhnlichen Strassen ist, werden diese chemischen Verbindungen auch bei Windstille in einem gewissen Umkreis der Autobahn verteilt. Stehen Freileitungsmaste in diesem Einflussbereich, werden sich die Sulfate auf den Isolatoren ablagern. Da beide Verbindungen wasserbindend sind, können sie, insbesondere bei Nebel, die Isolationsfestigkeit so stark herabsetzen, bis Fremdschichtüberschläge auftreten.

3. Einflussbereich

Anhand eines aufgetretenen Falles soll versucht werden, wenigstens annähernd den Gefahrenbereich einer Autobahn bezüglich Isolatorüberschlägen abzuschätzen. In den Wintermonaten, bei teilweise starkem Nebel aber niederschlagsfreien kalten Tagen, wurde festgestellt, dass die 220-kV-Leitung Gösigen-Flumenthal der Atel sukzessive an Isolationsfestigkeit einbüsste. Anfangs traten erfolgreiche Schnellwiedereinschaltungen auf, die mit der Zeit keinen Erfolg mehr hatten, aber dann in erfolgreiche Handwiedereinschaltungen übergingen. Schliesslich blieben auch die Handwiedereinschaltungen erfolglos und die Leitung erlitt definitive Abschaltungen, wobei sie nach einiger Zeit wieder in Betrieb genommen werden konnte. Diese immer nur eine Phase betreffenden Vorfälle

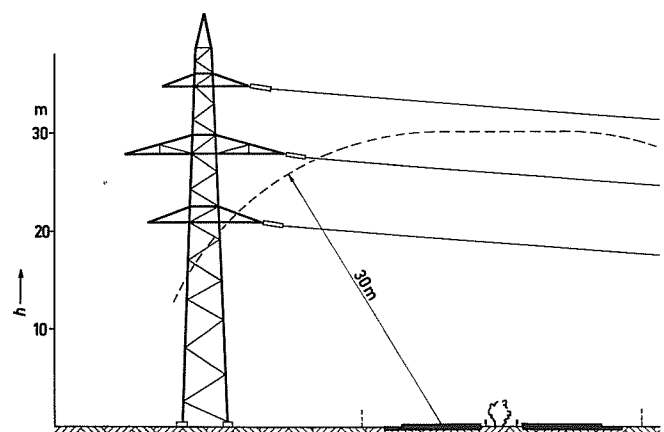


Fig. 1
Geometrische Situation
Maßstab 1:250
h Höhe

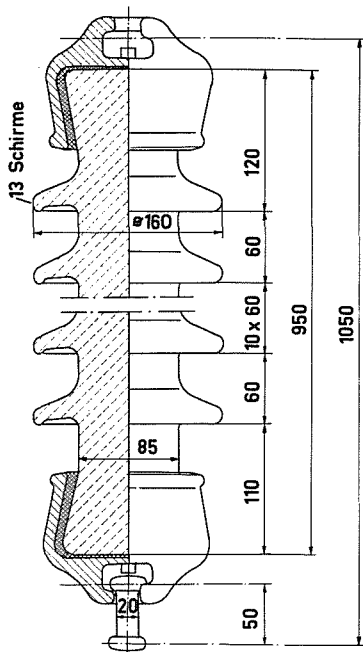


Fig. 2
Langstab-Isolator mit 13 Schirmen
Typ VKL 85/13

Bauhöhe	1050 mm
Kriechstrecke	1600 mm
Schlagweite	820 mm
Schirmzahl	13
Stehspannung 50 Hz, nass	210 kV
Stehstossspannung	450 kV

Das Porzellan ist mit einer Eingussmasse aus Bleiantimon Pb - Sb 90/10 mit der Eisenarmatur verbunden.

5. Laboruntersuchungen

5.1 Widerstandsverhalten der Oberflächenfremdschicht

Die beschriebenen Betriebsstörungen gaben Anlass, Laborversuche an vier natürlich verschmutzten Langstab-Isolatoren aus dem gefährdeten Leitungsabschnitt durchzuführen. Neben dem tatsächlichen Isoliervermögen der Isolatoren interessierte noch die Art der Verschmutzung.

Durch Röntgenbeugungsanalyse an Proben aus dem Oberflächenbelag wurde bestätigt, dass seine Hauptbestandteile Jurakalkstaub (CaCO_3) waren, der auch noch starke Elektrolyte bildende Bestandteile wie Natrium- und Kalziumsulfat enthielt.

Zur vergleichswisen Kennzeichnung des Verschmutzungsgrades von Isolatoren mit fester Fremdschichtbedeckung wird vielfach die Schichtleitfähigkeit beigezogen. Es ist dies der Leitwert eines Oberflächenquadrates auf dem Isolator [1]¹⁾. Für eine homogene Schicht erhält man sie aus einer Widerstandsmessung für den ganzen Isolator und dem sog. Formfaktor

$$f \approx \frac{\text{Kriechweglänge}}{\text{Umfangsmittel}} \text{ gemäss } \kappa_s = \frac{1}{R} f$$

Für den vorliegenden Isolator vom Typ VKL 85/13 findet man $f = 4,62$. Fremdschichten, die sich unter natürlichen Bedingungen bilden, weisen allerdings stets Ungleichmässigkeiten in der Schmutzverteilung auf. Daher wurde noch der jeweilige lokale Widerstand zwischen zwei nahe aufgesetzten Messelektroden für verschiedene Oberflächengebiete bestimmt, nachdem die Isolatoren zuvor befeuchtet worden waren. Die dabei erhaltenen Resultate aus totaler Widerstandsmessung wie auch den vielfachen lokalen Einzelmessungen auf den Ober- und Unterflächen der Schirme sowie am Strunk sind für die vier untersuchten Isolatoren in Tabelle I eingetragen. Danach liegen die jeweiligen Mittelwerte recht nahe beisammen. Da nun alle Isolatoren von einem Leitungsmast stammten, erschien eine mehr globale Betrachtung der Messwerte durchaus zulässig.

¹⁾ Siehe Literatur am Schluss des Aufsatzes.

fanden als Erklärung Überschlüge an der Isolatorenkette des untersten, die Autobahn überspannenden Leiterseiles eines Abspannmastes. Da die höher gelegenen Phasen auch von vier weiteren neben der Autobahn stehenden Masten keine Abschaltungen erlitten, könnte man versuchen, aus den geometrischen Verhältnissen eine grobe Abschätzung des Einflussbereiches der Autobahn vorzunehmen. Entsprechend der in Fig. 1 dargestellten Situation käme man auf einen Radius von ca. 30 m vom Mittelpunkt der näher gelegenen Fahrbahn aus. Aus Sicherheitsgründen dürfte angenommen werden, dass Isolatorenketten, die sich weiter als ca. 50 m von der nächsten Fahrbahn entfernt befinden, keine übermässig grosse Fremdbeschichtung mehr erleiden sollten, insbesondere, da die Sulfate durch Regen ohne weiteres abgewaschen werden.

4. Verwendete Isolatoren

Die betreffende 220-kV-Leitung ist mit je zwei der in Fig. 2 dargestellten Langstabisolatoren, Typ VKL 85/13, ausgerüstet. Die technischen Daten sind folgende:

Ergebnisse der Untersuchungen an den vier Leitungsisolatoren vom Typ VKL 85/13

Tabelle I

Isolator Nr.	Spezifische Schichtleitfähigkeit an der Isolatorenoberfläche bestimmt durch						Ermittlung der Spannungsfestigkeit am durchfeuchteten Isolator		
	Widerstandsmessung und Rechnung über den Formfaktor $\kappa_s = \frac{1}{R} f$ μS	Sondennmessungen an							
		Schirmoberseite		Schirmunterseite		Isolatorstrunk			
		Mittelwert κ_s μS	Örtlicher Höchstwert $\kappa_{s,\text{max}}$ μS	Mittelwert κ_s μS	Örtlicher Höchstwert $\kappa_{s,\text{max}}$ μS	Mittelwert κ_s μS	Örtlicher Höchstwert $\kappa_{s,\text{max}}$ μS	Höchster Haltewert U_H kV	Überschlagspannung $U_{\bar{u}}$ kV
1	4,2	9,7	18,0	6,3	15,5	1,9	15,5	50	60
2	3,8	7,1	28,6	2,2	5,8	1,5	3,9	98	100
3	3,8	9,3	40,0	3,0	6,3	2,1	4,8	107	110
4	4,6	9,0	28,6	8,8	17,8	3,7	12,8	86	90

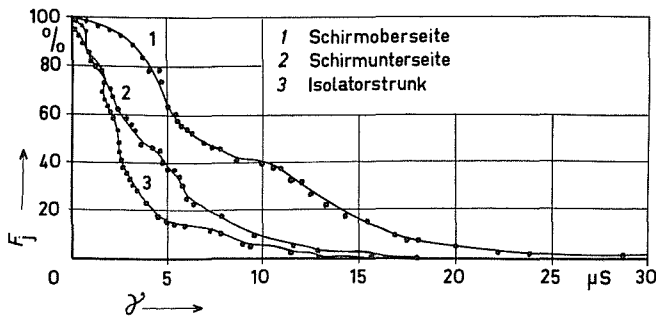


Fig. 3
Anteile der Schichtleitfähigkeiten auf den Isolatoren
gruppiert nach Niederschlagsstellen an der Oberfläche
 F_j Summenhäufigkeit; γ Schichtleitfähigkeit

Für die jeweiligen Isolatorabschnitte sind deshalb die anteilmässig gemessenen Schichtleitfähigkeiten, dargestellt als Summenhäufigkeiten der Gesamtzahl aller Einzelmessungen, in Fig. 3 aufgetragen. Die Darstellung lässt recht anschaulich eine Gruppierung des leitfähigkeitsmässig geordneten Fremdschichtbefalls der Isolatoren in der Reihenfolge: Schirmoberseite, Schirmunterseite, Isolatorstrunk, erkennen.

Für die 92 an der Schirmoberseite der vier Isolatoren durchgeführten Einzelmessungen gestattet daneben Fig. 4 noch einen Einblick in die Art der statistischen Verteilung der Schichtleitfähigkeit. Im vorliegenden Fall besteht offenbar eine exponentielle Abhängigkeit für diese, bei Ansetzung einer Gaussverteilung. Die Variationsbreite der Einzelwerte ist beträchtlich und verdeutlicht die äusserst starke Ungleichmässigkeit einer natürlichen unter Betriebsbedingungen gewachsenen

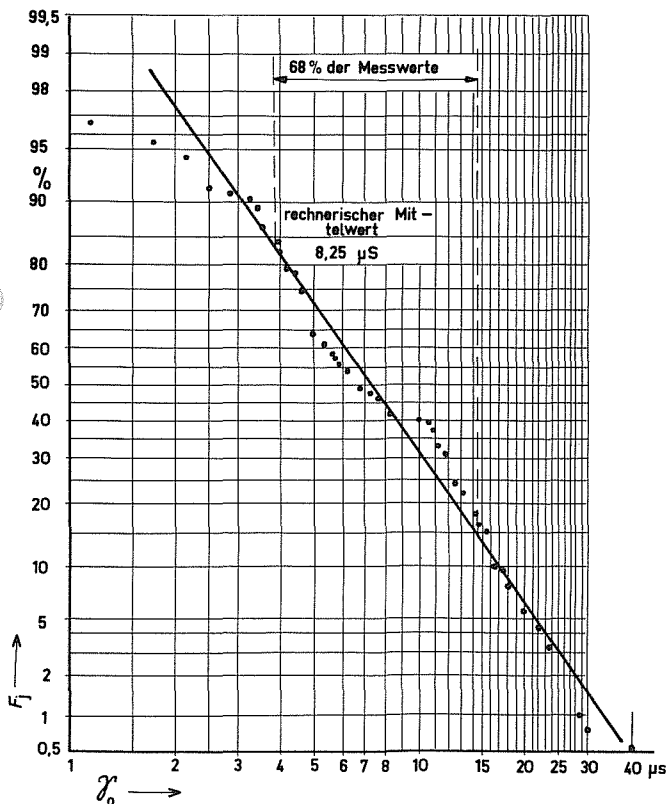


Fig. 4
Verteilung der an der Schirmoberseite gemessenen Schichtleitfähigkeiten für die vier Isolatoren
 F_j Summenhäufigkeit; γ_0 Schichtleitfähigkeit auf der Schirmoberseite

Fremdschicht. 68 % aller Einzelwerte (\pm eine Standardabweichung) liegen zwischen 3,9 und 14,8 μ S.

5.2 Spannungsfestigkeit der Isolatoren

An den in gleicher Weise wie bei den vorbeschriebenen Messungen feuchtigkeitsgesättigten Isolatoren wurde in einem für solche Versuche geeigneten Prüfkreis deren Spannungsfestigkeit ermittelt. Ein leistungsstarker Generator (635 kVA) speiste dabei mit guter Spannungsanpassung an einen Hochspannungstransformator (200 kV) niedriger Impedanz den einphasigen Prüfkreis. Die Hochspannung wurde dann stets direkt aufgeschaltet und während der Spannungsbeanspruchung der Isolator nicht mehr weiter befeuchtet. Die jeweils passend eingestellte Spannung lag bei jedem Einzelversuch solange am Isolator an, bis es zum Überschlag kam oder das vollständige Verlöschen der Teillichtbögen keinen Überschlag mehr erwarten liess. An jedem Isolator wurden so jeweils nach erneutem Befeuchten wenigstens sechs Einzelmessungen vorgenommen. Die dabei erhaltenen Grenzwerte der Halte- bzw. Überschlagsspannungen sind gleichfalls in Tabelle I eingetragen.

Der untersuchte Langstabisolator nach Fig. 2 ist dem bekannten und wiederholt sowohl unter natürlichen Bedingungen

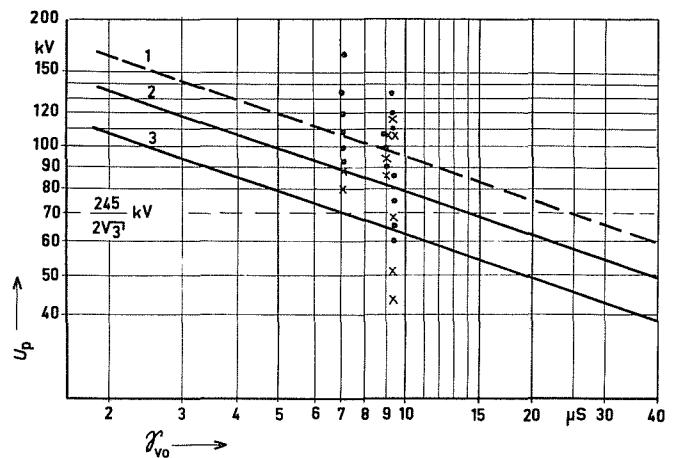


Fig. 5
Vergleich des im Netzbetrieb überschlagenen Langstabisolators vom Typ VKL 85/13 mit dem Isolator vom Typ VKL 75/14

U_p Prüfspannung; γ_{vo} Schichtleitfähigkeit eines Oberflächenquadrates
1 50%-Überschlagsspannung des Isolators vom Typ VKL 75/14, gemessen bei künstlicher Verschmutzung nach dem Kieselgurverfahren. Standardabweichung $s = 10\%$. Gültig für einen Isolator.

2 Kriechwegproportional auf den im Betrieb überschlagenen Isolator umgerechnete 50%-Überschlagsspannung.

3 2,3%-Überschlagsspannung für den im Betrieb überschlagenen Isolator. $U_{50\%} - 2s$ ($s = 10\%$ angenommen wie beim VKL 75/14).

Messwerte der Isolatoren aus dem Betrieb, vom Typ VKL 85/13

● Überschläge } jeweils dem Mittelwert der auf dem Schirm gemessenen Schichtleitfähigkeit zugeordnet.
× Haltewerte }

als auch im Prüffeld bei künstlicher Verschmutzung erprobten Isolator VKL 75/14 sehr ähnlich. Bei Versuchen mit künstlicher Verschmutzung nach dem VDE-Kieselgurverfahren wurde schon wiederholt am Leitungsisolator vom Typ VKL 75/14 die Spannungsfestigkeit in Funktion von der Schichtleitfähigkeit gemessen [2; 3]. Als Ergebnis bereits früher ausgeführter eigener Versuche zeigt Fig. 5, Kurve 1, diese Abhängigkeit. Aufgrund der bereits erwähnten geometrischen Ähnlichkeit dieses Isolators mit dem betriebsmässig verschmutzt erprobten vom Typ VKL 85/13 wurde auch noch die labormässig ermittelte Spannungs-kennlinie der 50%-Überschlagsspannung nach

Fig. 5, Kurve 1, kriechwegproportional auf diesen Isolator aus der Atel-Leitung übertragen, wobei zum Vergleich die auf der Schirmoberseite gemessenen Schichtleitfähigkeiten herangezogen wurden. Die Darstellung (Fig. 5) zeigt eine recht gute Übereinstimmung der Messwerte der Isolatoren aus dem Betrieb mit der umgerechneten Abhängigkeit der 50%-Überschlagsspannung. Auch die recht starke Streuung der Überschlags- und Haltwerte der Isolatoren aus dem Betrieb ist von Laborerfahrungen bei künstlicher Verschmutzung her bekannt.

So hatten die früheren Messungen für den VKL 75/14 eine mittlere quadratische Streuung der entsprechenden Messwerte von $s = 10\%$ ergeben. Die unter Berücksichtigung dieser Streuung (Abzug von zwei Standardabweichungen vom 50%-Wert) für den Isolator nach Fig. 2 dann errechnete Haltspannung ergibt, dass für die Betriebsspannung von pro Isolator $240/2x/\sqrt{3} = 70$ kV höchstens noch $7 \mu\text{S}$ spezifische Oberflächen-Schichtleitfähigkeit zugelassen werden könnten. Die Isolatoren aus dem Betrieb weisen auf dem Schirm gemessen jedoch im Mittel $7...8 \mu\text{S}$ auf, teils aber bedeutend mehr, bis zu maximal $40 \mu\text{S}$.

Durch die Versuche ist damit eindeutig die starke Isolationsminderung und an einem Isolator sogar die Unterschreitung der Betriebsbeanspruchung nachgewiesen.

Obwohl doch die unter Laborbedingungen erhaltenen Aussagen zunächst nur für eine homogene Oberflächenfremdschichtbedeckung Gültigkeit haben, der Bedeckungsgrad der Isolatoren aus dem Betrieb aber stark ungleichmässig war, ergab die vergleichende Betrachtung darüber hinaus doch, dass zumindest bei solchen einfachen Isolatorbauformen labor-

mässig ermittelte Ergebnisse sogar ähnlicher Isolatoren mit guter Näherung auf das Betriebsverhalten übertragbar sind.

6. Gegenmassnahmen

Die Selbstreinigungskraft der Isolatoren gegenüber Sulfaten ist relativ gross. Gefahr besteht vor allem in nebelreichen Gegenden während längeren niederschlagsfreien Perioden im Winter. So bestünde z. B. die Möglichkeit, die Isolatoren unter Spannung künstlich zu waschen [4]. Eine andere Lösung ist die Behandlung der Isolatoren ca. alle zwei Jahre mit Silikonfett; dazu muss die Leitung aber abgeschaltet werden.

Bei der Projektierung einer Leitung in unmittelbarer Nähe einer Autobahn ist dem Verschmutzungsproblem Beachtung zu schenken und je nach den örtlichen Verhältnissen und den meteorologischen Gegebenheiten sollte auf die Abstände der Isolatoren zur Autobahn geachtet werden.

Literatur

- [1] Vorläufige Richtlinien für die Untersuchung von Freiluft-Isolatoren für Anlagen mit Wechselspannungen über 1 kV unter Fremdschichteinfluss. VDE-Vorschrift 0448/1.63.
- [2] H. Baatz e. a.: Expérience récente d'exploitation des isolateurs pollués et méthodes d'essais permettant d'évaluer leur pouvoir isolant. Rapport CIGRE No. 212, 1964.
- [3] T. Weinmann: Beitrag zur Normierung der Fremdschichtprüfung von Hochspannungsisolatoren. Brown Boveri Mitt. 55(1968)7, S. 351...358.
- [4] T. Fujimura, M. Okayama and T. Isozaki: Hot-line washing of substation insulators. Trans. IEEE PAS 89(1970)5, p. 770...774.

Adressen der Autoren:

W. Schmidt, Ingenieur, AG Brown, Boveri & Cie., 5401 Baden, und Dr. sc. techn. F. Schwab, Dipl. Ing. ETH, Aare-Tessin AG für Elektrizität, 4600 Olten.