

Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association Suisse des Electriciens, de l'Association des Entreprises électriques suisses

Band: 81 (1990)

Heft: 19

Artikel: Erfahrung mit Einsatz von Verbundisolatoren

Autor: Papailiou, Konstantin O. / Fluri, Walter / Wermelinger, Anton

DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-903165>

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: 09.11.2024

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

Erfahrung mit Einsatz von Verbundisolatoren

Konstantin O. Papailiou, Walter Fluri und Anton Wermelinger

Weltweit setzen Elektrizitätswerke und Bahnen Verbundisolatoren verstärkt als die Alternative zu Porzellan- und Glasisolatoren ein. Denn sie bieten gegenüber herkömmlichen Isolatoren erhebliche Vorteile: bis zu 10fach niedrigeres Gewicht; dank Hydrophobie bessere elektrische Eigenschaften; durch hohe Elastizität Unempfindlichkeit gegenüber Bruch und Vandalismus; und nicht zuletzt, durch ihre schlanke Bauform, eine Verbesserung der Umweltverträglichkeit der Freileitungsübertragungsnetze.

Des entreprises électriques et des sociétés de chemin de fer du monde entier utilisent les isolateurs composites de manière accrue, en alternative aux isolateurs en porcelaine et en verre. Par rapport aux isolateurs usuels ils présentent des avantages considérables: poids jusqu'à 10 fois inférieur; grâce à leur hydrophobie, amélioration de leurs propriétés électriques; grâce à leur élasticité élevée, insensibilité à la rupture et au vandalisme; sans oublier leur minceur qui améliore la compatibilité avec l'environnement des réseaux de transport d'énergie aériens.

Adresse der Autoren:

Konstantin O. Papailiou, Direktor, Walter Fluri, Technischer Leiter, Anton Wermelinger, Projektleiter, Sefag AG, Elektrotechnische Spezialartikel, Werkstrasse 7, 6102 Malters

Hochspannungsisolatoren sind für die Betriebssicherheit und Wirtschaftlichkeit von elektrischen Energieübertragungssystemen von entscheidender Bedeutung, und es wundert daher nicht, dass an diese Bauteile besonders hohe Zuverlässigkeitsanforderungen gestellt werden. Neben den bisher üblichen Langstabisolatoren herkömmlicher Bauart aus Porzellan und Kappenisolatorketten aus Glas oder Porzellan haben Verbundisolatoren eine zunehmende Bedeutung in der Isoliertechnik von Hochspannungsfreileitungen gefunden.

Bei richtiger Auslegung, sowohl in konstruktiver Hinsicht als auch bezogen auf die Materialauswahl, haben Verbundisolatoren überzeugende Qualitäten. Während bei konventionellen Systemen (Porzellan, Glas) aus werk-

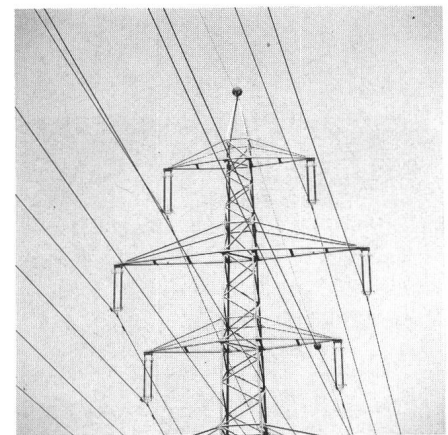


Bild 2 400-kV-Hochspannungsfreileitungsmast mit Silikonisolatoren (NOK)

stofftechnischen Gründen eine getrennte Optimierung von mechanischen und elektrischen Funktionen nicht durchführbar ist, können diese Gesichtspunkte bei der Werkstoffauswahl für Verbundisolatoren einzeln berücksichtigt werden. Die daraus resultierende Konstruktion kann in drei Bereiche unterteilt werden (Bild 1):

- Mechanisch hochfester Stab zur Aufnahme der Zugkräfte.
- Den Stab umgebende, zur Kriechwegverlängerung schirmförmig ausgebildete Kunststoffhülle, welche die Isolationsaufgabe übernimmt.
- Metallarmaturen an beiden Enden des Stabes zur Krafteinleitung.

Ein Hauptvorteil des Verbundisolators ist das geringe Gewicht, das Transport und Montage erleichtert und den Bau leichter Masten erlaubt. Bei Hochspannungsfreileitungen kann das Gewicht konventioneller Isolatoren fast 20% der gesamten Vertikallasten eines Mastes erreichen. Verbundisolatoren dagegen ermöglichen gegenüber herkömmlichen Isolatoren eine Gewichtseinsparung bis über 90% (Bild 2). Die Schockempfindlichkeit

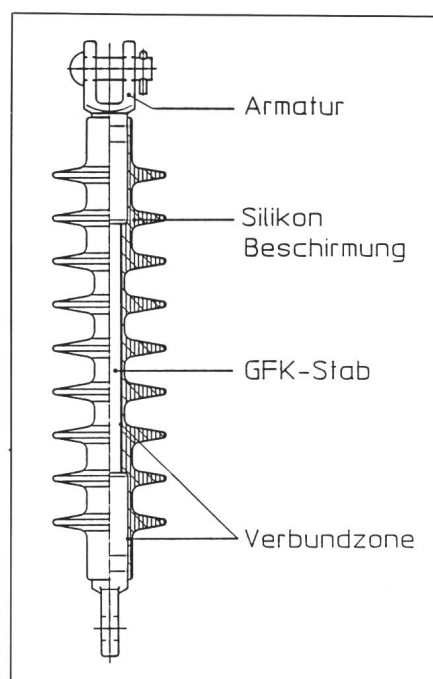


Bild 1 Bauweise und Komponenten von Verbundisolatoren

der Verbundkonstruktion gegenüber Lichtbogen oder mechanischen Schockbelastungen (Schlag oder Beschuss) ist wesentlich geringer als die des konventionellen Isolators. Durch die schlanke Bauweise ist der Verbundisolator auch ein viel schlechter zu treffendes Ziel bei Beschussversuchen (Vandalismus), was in aussereuropäischen Ländern von erheblicher Bedeutung ist. Geradezu prädestiniert ist der Verbundisolator für den Einsatz im Fahrleitungsbetrieb der Eisenbahn (Bilder 3, 4), da hier aufgrund des geringen Gewichtes, vor allem im Hinblick auf die immer höheren Fahrtge-



Bild 3 15-kV-Bahnisolator der Sefag AG im Lötschberg-Tunnel (BLS)

schwindigkeiten, unkontrollierte Schwingungen des Fahrleitungssystems weitgehend vermieden werden können.

Durch diese Eigenschaften des Verbundisolators sind auch Lösungen zum Bau völlig neuartiger Freileitungskonstruktionen denkbar. Infolge des geringen Gewichtes können Verbundisolatoren im freien Spannungsfeld als Phasenabstandhalter eingebaut werden, was einerseits das «Seiltanzen» unterbindet und andererseits den Bau extrem kompakter Freileitungen ermöglicht (Bild 5). Der Leiterabstand kann dabei auf den durch das Isolationsvermögen der Luft vorgegebenen Mindestabstand verringert werden. Dadurch können Leitungen mit kleinerer Trassenbreite – und mit geringerer Beeinträchtigung des Landschaftsbildes – gebaut werden.

Erfahrungen mit Verbundisolatoren

Die ersten Freileitungs-Isolatoren aus organischen Materialien wurden vor über 25 Jahren in den U.S.A. serienmässig in grösseren Stückzahlen eingesetzt. Es waren Giessharz-Isola-

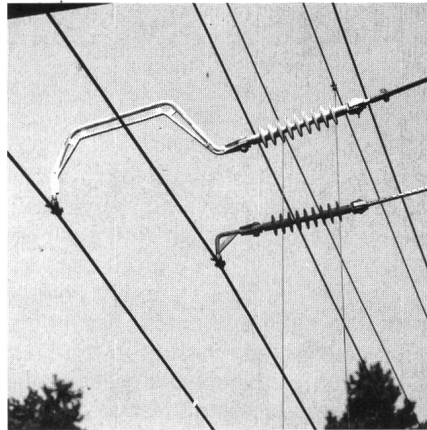


Bild 4 15-kV-Silcosil-Bahnisolatoren (SBB)

toren; viele davon mussten wegen verschiedenen Problemen nach kurzem Einsatz ausgetauscht werden.

Darauf aufbauend folgte dann vor ungefähr 20 Jahren ein «echter» Verbundisolator mit Porzellanschirmen, die von einem giessharzummüllten Glasfaserstab getragen wurden; solche Isolatoren wurden meistens bei Mittelspannungsleitungen eingesetzt. Ein paar Jahre später schliesslich begannen Hersteller aus der Bundesrepublik, den Vereinigten Staaten, Frankreich, England, Italien und später auch aus der Schweiz Verbundisolatoren in der heutigen Form (Bild 1) zu bauen.

Diese erste Generation von Verbundisolatoren hat, wegen der oben erwähnten Vorteile, bei den Leitungsbetreibern weltweit grosses Interesse geweckt. Viele Elektrizitätswerke haben bald angefangen, mit Verbundisolatoren zu experimentieren und diese zunächst bei kurzen Leitungsabschnitten einzusetzen, und zwar vor allem dort, wo sich diese Isolatoren aufgrund ihrer Eigenschaften für besonders vorteilhafte Problemlösungen eigneten. Sie verfolgten aber auch das Ziel, gleichzeitig Erfahrungen für einen späteren, verstärkten Einsatz zu sammeln.

Leider sind bei einigen Isolatorkonstruktionen der ersten Generation ver-

schiedene Probleme aufgetreten, so z.B.:

- Kriechspurbildung und Oberflächenerosion am Schirmmaterial
- Abfall der Lichtbogenbeständigkeit, insbesondere alterungsbedingter Verlust der ursprünglich besonders guten Fremdschichteigenschaften der Schirmoberfläche
- Verlust der anfänglichen mechanischen Festigkeit, z.T. Ausrutschen des Stabes aus der metallischen Endarmatur
- Haftungsprobleme und deshalb Durchschläge an den Grenzflächen zwischen den verschiedenen Materialien des Isolators.
- Eindringen von Feuchtigkeit, was zusammen mit ungenügender Haftung und ungünstiger elektrischer Bemessung der Metallarmaturen zu Sprödbrüchen (brittle fracture) am tragenden Glasfaserstab geführt hat.

Diese Probleme führten vor einigen Jahren nochmals zu einer «Denkpause» beim Einsatz von Verbundisolatoren. Die offensichtlichen Vorteile solcher Isolatoren haben aber die Hersteller weltweit angespornt, diese Probleme anzugehen, zu lösen und eine weit

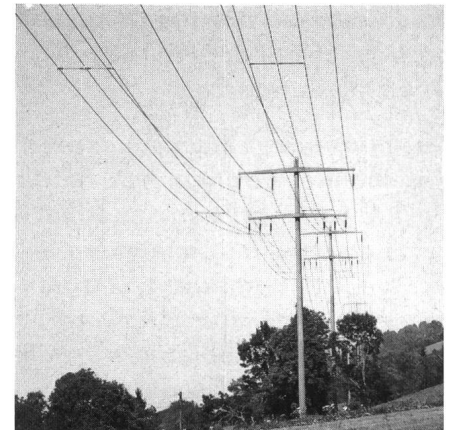


Bild 5 50/20-kV-Kompaktleitung der CKW mit silikonbeschirmten Phasenabstandhalter

verbesserte, zweite Generation von Verbundisolatoren auf den Markt zu bringen. Nicht nur das durch verstärkte Forschung und Langzeitversuche erreichte bessere Verständnis für mögliche Versagensmechanismen, sondern auch die Optimierung der Produktionsabläufe sowie ein höheres Qualitätssicherungsbewusstsein haben nun zu Verbundisolatoren geführt, die ein hohes Zuverlässigkeitsniveau haben und eine angestrebte Lebenserwartung

von über 50 Jahren vorweisen. Es wundert daher nicht, dass in den letzten fünf Jahren weltweit wieder vermehrt Verbundisolatoren Einsatz fanden. Dies beweisen auch vor kurzem veröffentlichte Befragungsergebnisse und Statistiken, welche im folgenden Abschnitt zusammengefasst dargelegt werden.

Bericht über weltweite Erfahrungen mit Verbundisolatoren

Anfang 1987 hat die Cigré-Arbeitsgruppe, die sich mit Verbundisolatoren befasst, einen Fragebogen mit diversen Fragen über die Erfahrungen mit Verbundisolatoren an verschiedene Elektrizitätswerke in aller Welt verschickt. Parallel dazu haben der Kanadische Elektrotechnische Verein (CEA) und die Hochspannungsforschungsgemeinschaft der Vereinigten Staaten von Amerika (EPRI) ähnliche Fragebogen in Kanada und den USA verteilt. Die Antworten liegen seit einiger Zeit vor und sind ausgewertet und vor kurzem veröffentlicht worden [2, 3]. Nachfolgend sind sie auszugsweise wiedergegeben:

Zunächst ist in Bild 6 die regionale Verteilung der Elektrizitätswerke aufgeführt, die die Fragebögen ausgefüllt

Elektrizitätswerke in Region	Fragebogen von		
	Cigré	EPRI	CEA
Australien	7	-	-
Kanada	7	-	4
Europa	14	-	-
Lateinamerika	2	-	-
Südafrika	1	-	-
U.S.A.	29	60	-

Bild 6 Anzahl der Antworten bei Umfrage über Verbundisolatoren

haben und somit über Erfahrung mit Verbundisolatoren verfügen. Bild 7 gibt die Gesamtanzahl der in Einsatz stehenden Verbundisolatoren wieder, und zwar aufgeschlüsselt sowohl nach Hänge-, Abspann- und Stützisolatoren als auch nach der Spannungsebene der Netze, wo der Einsatz stattfindet. In der gleichen Tabelle wird die Betriebs- erfahrung mitaufgeführt, die sich aus der Anzahl der Isolatoren mal der Anzahl der Jahre im Betrieb für die jewei-

lige Isolatorenart und Spannungsebene ergibt. In der Schweiz sind nach eigenen Schätzungen etwa 10 000 ... 20 000 Verbundisolatoren (einschliesslich Phasenabstandhalter und Bahnisolatoren) verschiedener Hersteller (wovon rund die Hälfte aus lokaler Fertigung) seit über 10 Jahren in Betrieb.

zungsverhalten (27% der befragten EWs), leichter Transport und Montage (32%), hohes Festigkeits-/Gewichtsverhältnis (20%), Beschussicherheit (38%), bessere Ästhetik (13%) sowie diverse andere Gründe (Schutz gegen Seiltanzen, Bruchsicherheit bei Seilbruch und Eisabwurf, Leitungs-

Netzspannung [kV]	< 200	200...300	300...500	> 500	Stück Total
Hängeisolatoren					
Anzahl	43 281	21 710	13 523	3 512	82 026
Betriebs- erfahrung	304 089	131 694	73 215	20 316	529 314
Abspannisolatoren					
Anzahl	10 391	3 104	5 030	580	19 015
Betriebs- erfahrung	67 861	18 663	24 448	1 424	112 394
Stützisolatoren					
Anzahl	28 414	7 313	380	22	36 129
Betriebs- erfahrung	150 437	36 660	1 882	117	189 096

Bild 7 Übersicht über die im Einsatz stehenden Verbundisolatoren

Betriebs- erfahrung: Anzahl Isolatoren mal Anzahl Betriebsjahre

Zu diesen Zahlen noch folgende Hinweise: Die im Cigré-Bericht erfassten 135 000 Isolatoren entsprechen etwa 50% der 288 000 Isolatoren, die nach Information der Verbundisolator-Hersteller bis Ende 1986 für Spannungen über 100 kV verkauft worden waren. Die Anzahl der Isolatoren würde sich beträchtlich erhöhen, wenn die Isolatoren für die niedrigeren Spannungsebenen und die Bahnstromleitungen mitberücksichtigt würden. So wird z.B. heute in den USA und Kanada der Isolatorenbedarf für Mittelspannung (bis 100 kV) zu fast einem Drittel von Verbundisolatoren abgedeckt [2, 3]. Weiterhin ist zu beachten, dass in den Jahren 1988, 1989 und 1990, seit Abschluss des Cigré-Fragebogens, insbesondere in Nordamerika die Produktion und der Einsatz von Verbundisolatoren sehr stark gestiegen ist. Schliesslich muss bei Stückzahlvergleichen mit konventionellen Isolatoren (Glas, Porzellan) berücksichtigt werden, dass ein Verbundisolator vor allem bei den höheren Spannungen mehrere solche Isolatoreinheiten ersetzt.

Die Gründe, welche von den befragten Elektrizitätswerken als massgebend für den Einsatz von Verbundisolatoren angegeben wurden, sind im wesentlichen das sehr gute Verschmut-

kompaktierung, Notstromleitungen, besseres RIV-Verhalten, minimale Wartungskosten).

In den Cigré-Fragebögen wurde in 935 Fällen von einem Versagen von Isolatoren berichtet (entspricht 0,7%), im Vergleich zum EPRI-Fragebogen mit 0,43%. Beide Zahlen sind aus zwei Gründen bei weitem zu hoch: Einerseits beinhalten die eingegebenen Fälle viele gesunde Isolatoren, die nach ein oder zwei Versagern vorsichtshalber ausser Betrieb genommen worden sind. Andererseits verfälschen Versagensfälle von Verbundisolatoren der ersten Generation von Herstellern mit bekannterweise problematischen Produkten das Bild in der Statistik. Das wird ersichtlich durch einen weiteren Punkt im Fragebogen, nämlich durch die Antwort der EWs auf die Frage nach dem Grad der Zufriedenheit: beim EPRI-Fragebogen (60 EWs) machten 70% der Elektrizitätswerke gute Betriebserfahrungen, 18% zufriedenstellende und lediglich 4% waren unzufrieden.

Die Schlussfolgerung des IEEE-Berichtes [3] lautet sinngemäss, dass Verbundisolatoren inzwischen ein kommerziell ausgereiftes Serienprodukt geworden sind, das für einen mannigfaltigen Einsatz bereit und als solches in vielen Ländern schon anerkannt ist.

Materialwahl und Konstruktion von Verbundisolatoren

Endarmaturen

Während die wesentlichen elektrischen Anforderungen von Verbundisolatoren der Silikonbeschirmung zugeordnet sind, werden die mechanischen Funktionen dem GFK-Stab (glasfaserverstärkter Kunststoff) und den Metallarmaturen zugeordnet (Bild 1). Bild 8 zeigt die am meisten angewendeten Armierungssysteme verschiedener Hersteller, und zwar die Keiltechnik, die Konusklebtechnik, die Mehrkantpresstechnik und die bei der Sefag AG, Malters, entwickelte Koaxial-Pressstechnik.

Alle diese Armaturen reduzieren die mechanische Festigkeit des Glasfaserstabes (GFK), da sie mehr oder weniger lokale Spannungspitzen an den Grenzflächen GFK-Stab-Armatur hervorrufen. Da nun der GFK-Stab eine teure Komponente eines Verbundisolators ist, ist für eine optimale und wirtschaftliche Auslegung des Stabquerschnittes eine möglichst genaue Kenntnis des mechanischen Stab-Armatur-Verhaltens von entscheidender Bedeutung. Dazu kommt, dass die mechanische Festigkeit von Verbundisolatoren nicht nur von der Höhe, sondern auch von der Dauer der aufgetragenen Belastung abhängt, was wiederum in einem für jeden Isolator oder jede Endarmatur typischen Last-Zeit-Diagramm ausgedrückt wird (Bild 9).

Aus diesem Grunde wurde vor nicht allzu langer Zeit das Kurzzeit- und Langzeitverhalten verschiedener Fabrikate in einem Grossversuch untersucht [4]. Folgende Eigenschaften von drei verschiedenen Isolatortypen wurden dabei gemessen: die mittlere Bruchlast, die Last-Zeit-Kurve unter statischer Belastung und das mechanische Verhalten der Isolatoren unter zusätzlicher Wechselzugbeanspruchung.

In Bild 10 sind die Ergebnisse der statischen Zerreißprüfung für die verschiedenen Isolatoren zusammengestellt, und zwar sowohl als Bruchlast in kN als auch – zum besseren Vergleich, da die GFK-Stäbe z.T. verschiedene Durchmesser hatten – als Bruchspannung in MPa. Wie man leicht erkennt, erreicht die Sefag-Koaxialarmatur mit einer Bruchspannung von 1076 MPa fast die Bruchspannung des GFK-Stabes (ungefähr 1200 ... 1300 MPa) und liegt somit um einiges höher als die anderen mitgeprüften Armaturentypen.

Bild 8
Gebräuchliche
Armaturentypen
verschiedener
Isolatorenhersteller

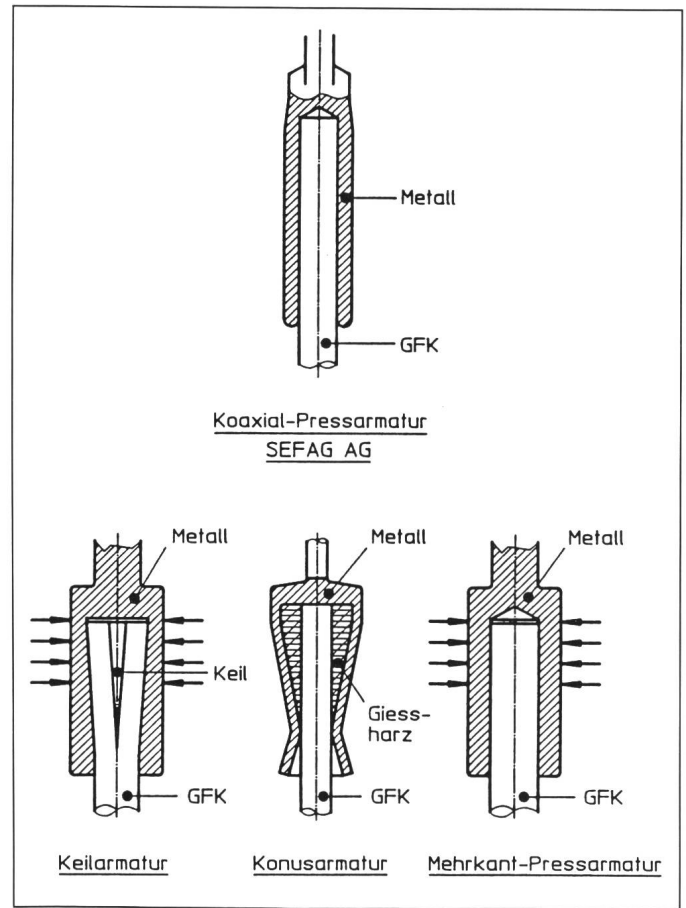
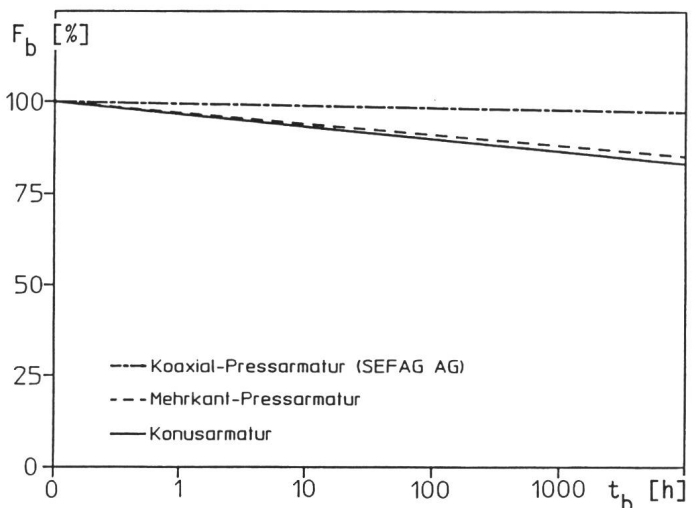


Bild 9
Bruchlast-Zeit-
Diagramm für
verschiedene
Armaturentypen



F_b Bruchlast in Abhängigkeit von t_b , bezogen auf die Kurzzeitbruchlast
 t_b Zeit bis zum Bruch bei statischer Zugbeanspruchung

Armaturentyp	Mittlere Bruchlast [kN]	GFK-Bruchspannung [MPa]
Konusarmatur	176 ± 6	823
Mehrkantpressarmatur	219 ± 1	796
Koaxialarmatur	338 ± 4	1 076

Bild 10 Mittlere Bruchlast für verschiedene Armaturentypen im Vergleich

Ein theoretischer Berechnungsvergleich der Spannungsverteilung im Armaturenbereich des GFK-Stabes zwischen der vielfach üblichen Radialmehrkantpresstechnik und der neuen Koaxialpresstechnik der Sefag AG hat anschliessend gezeigt, dass letztere die besten Ergebnisse von allen geprüften Armaturen aufweist, da sie die für das Einsetzen von Brüchen verantwortlichen, lokalen Scherspannungen im GFK-Stab stark herabsetzt.

Auch das Langzeitverhalten dieser Armaturenart ist überdurchschnittlich. Das wird aus Bild 9 ersichtlich. Dort sind nämlich für alle getesteten Isolatoren die Last-Zeit-Kurven aufgetragen, wobei zum besseren Vergleich die Bruchlasten (s.o. Bild 10) in Prozenten angegeben werden, so dass alle Kurven gemeinsam bei 100% anfangen und dann mit jeweils unterschiedlicher Steigung abfallen. Die Koaxialpressarmatur zeigt eindeutig den flachsten Verlauf von allen geprüften Isolatoren und behält somit die höchste Anfangsbruchlast praktisch konstant über die ganze Zeit bei.

Schliesslich sind die Versuchsergebnisse bei überlagerter Beanspruchung durch statischen Zug und dynamische Wechselbeanspruchung von Bedeutung. Wie man aus [4] entnimmt, zeigt die Koaxialpressarmatur lediglich einen Abfall von 34% der Bruchlast gegenüber der statischen Bruchlast. Die Radialmehrkantverpressung dagegen fällt um volle 75% ab, was wiederum zeigt, dass die hier neu entwickelte Presstechnik Isolatorenarmaturen ermöglicht hat, die relativ unempfindlich auch gegenüber dynamischen Beanspruchungen – wie sie z.B. bei Seilschwingungen auftreten können – sind.

Der Glasfaserstab

Der Glasfaserstab (GFK) ist ein sog. Verbundwerkstoff. Er besteht aus einer Vielzahl von Glasfasern, die mit einer sie umgebenden Matrix chemisch gebunden sind und erreicht eine höhere mechanische Festigkeit als Stahl. Dabei gibt es, was die Qualität des Endproduktes betrifft, wesentliche Unterschiede sowohl in den Eigenschaften der zwei Grundkomponenten (Glasfaser- und Matrixmaterial), als auch im Herstellungsverfahren. Beim letzteren zeichnet sich das Strangpressen (im Gegensatz zu dem bei den meisten Stabherstellern durchgeführten Strangziehen) durch eine gleichmässige Werkstoffstruktur und durch eine optimale Kontrolle und Regelung der

qualitätsbeeinflussenden Parameter wie z.B. Homogenität und Unidirektionalität der Glasfaser über dem Stabquerschnitt.

Was das Matrixmaterial betrifft, so haben neuere Untersuchungen gezeigt [5], dass eine Epoxydharzmatrix viel günstigere Werte aufzeigt als eine Polyestermatrix. Insbesondere neigen GFK-Stäbe mit Polyestermatrix zu einem relativ hohen Verlust (bis 30%) ihrer longitudinalen Scherfestigkeit bei einem Temperaturanstieg von 20 °C auf 55 °C, was sich auf das Bruchverhalten des Stabes dementsprechend negativ auswirkt.

Entscheidend aber für die Beurteilung der Eignung des GFK-Stabes für seinen Langzeiteinsatz als tragendes Element in einem Verbundisolator ist die Qualität der verwendeten Glasfasersorte. Wie schon oben berichtet, haben Betriebserfahrungen vor allem in den 70er Jahren gezeigt, dass einige wenige Verbundisolatoren während des Betriebes mechanisch versagt haben und zwar bei Belastungen, die wesentlich kleiner als die Nennbruchlasten des GFK-Stabes waren. Die dabei beobachteten Bruchflächen waren durch eine relativ scharfe, glatte Oberfläche senkrecht zur Stabachse und einer kleineren in Richtung der Stabachse delaminierten Restbruchfläche gekennzeichnet. Das ganze wird als Sprödbbruch (engl. brittle fracture) bezeichnet und galt bis vor kurzem als das einzige noch offene Problem beim Einsatz von Verbundisolatoren [1].

Über den möglichen Entstehungsmechanismus von solchen Sprödbrüchen wurde verschiedentlich ausführlich berichtet. Es wird heute generell angenommen, dass diese Brüche auf den Eingriff von Säuren (insbesondere Oxalsäure) auf die Glasfasern zurückzuführen sind, wobei diese Säuren durch äussere und innere Entladungstätigkeit bei feuchter Luft in jedem Hochspannungsisolator produziert werden können.

Bild 11 zeigt den Einfluss von Säuren auf die Festigkeit des für Verbundisolatoren meistens verwendeten E-Glases. Andererseits zeigen detaillierte Untersuchungen in [6] sowie eigene Versuche, dass es säureresistente Glassorten gibt (ECR-Glas), die auch nach längerem Eintauchen in Lösungen der oben genannten Säuren keine Anzeichen von Oberflächenbeschädigungen und Spannungsrisskorrosion aufweisen. Diese hohe Widerstandsfähigkeit von ECR-Gläsern gegenüber Säureangriffen und somit gegenüber

den eingangs erwähnten Sprödbrüchen ist durch deren Glaszusammensetzung verständlich: ECR-Gläser beinhalten im Vergleich zu den vielfach noch verwendeten E-Gläsern wesentlich weniger Bor-, Aluminium- und Calcium-Ionen. Diese Ionen werden beim E-Glas gegen Protonen aus der Säurelösung ausgetauscht, was in der Folge zu hohen, mechanischen Oberflächenspannungen an der Glasfaseroberfläche, zu Spannungsrissen und letztlich zu Glasbrüchen führen kann.

Die Silikonbeschichtung

In Anlehnung an die langjährigen, positiven Betriebserfahrungen mit den klassischen Isolatoren (Porzellan, Glas), deren Isolatorenoberfläche in Schirmform gestaltet ist, hat es sich auch bei Verbundisolatoren bewährt, den Glasfaserstab mit einer äusseren Schutzschicht in Schirmform aus

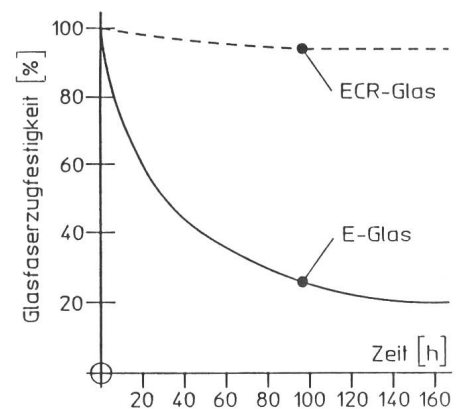


Bild 11 Säurefestigkeit von E- und ECR-Glas

ausgezogen E-Glas in 1-molarer Oxalsäure
gestrichelt ECR-Glas in 5%iger H₂SO₄-Lösung

E-Glas: herkömmliches Glas für GFK-Stäbe
ECR-Glas: säureresistentes Glas für GFK-Stäbe

einem organischen Material, einem Kunststoff mit den erforderlichen elektrischen, mechanischen und chemischen Eigenschaften, zu umgeben. Dadurch lassen sich beim Verbundisolator grosse Kriechwege bei vergleichsweise kurzer Baulänge realisieren. Dies ergibt ein sehr gutes Isolationsvermögen, auch unter erschwerten Bedingungen in stark verschmutzter Atmosphäre (wie z.B. in der Nähe von Kraftwerken, Zementfabriken, Aluminiumhütten oder in bestimmten Küstenbereichen).

Von den verschiedenen, seit Anfang der Entwicklung von Verbundisolatoren eingesetzten Kunststoffen, wie PTFE (Teflon), EPM (Ethylen-Propylen-Monomer), EPDM (Ethylen-Propylen-Di-*em*-Monomer) und Silikonkautschuk (SIR) hat sich letzteres als das eindeutig beste Schirmmaterial herausgestellt. Immer mehr Verbundisolatoren-Hersteller, die früher andere Materialien verwendet haben, fangen an, mit Silikonschirmen zu experimentieren.

Die grundlegenden Eigenschaften von Silikon als Material der Hochspannungsisolieretechnik wurden vor kurzem in [7] behandelt. Silikonkautschuk weist eine hochgradig simultane Resistenz gegen die verschiedensten chemischen und physikalischen Einflüsse auf. Neben der sehr guten thermischen Stabilität ist vor allem die ausgezeichnete Beständigkeit gegen Ozon, Coronaentladung, ionisierende Strahlung, Feuchtigkeit, Flammeneinwirkung usw. zu nennen.

Silikonkautschukmischungen sind im Vergleich zu anderen Elastomeren als schwer brennbar einzustufen. Bei Flammeneinwirkung von aussen entstehen als gasförmige Verbrennungsprodukte in erster Linie Wasserdampf und Kohlendioxid, als fester Rückstand bleibt Siliziumdioxid. Da Siliziumdioxid gleichfalls über gute Isoliereigenschaften verfügt, entstehen bei Silikonkautschuk unter dem Einfluss konzentrierter Entladungen, z.B. Überschlägen, an deren Fusspunkten Temperaturen von bis zu 1300 °C auftreten, keine direkt leitfähigen Kriechspuren wie bei anderen Kunststoffen. Es bilden sich dabei praktisch keine korrosiven oder unmittelbar toxischen Produkte. Silikonkautschuk ist vollkommen halogenfrei.

In der Schweiz wurde die Silikon-technologie von Anfang an, d.h. vor rund 10 Jahren, basierend auf den langjährigen, positiven Erfahrungen mit Silikonendverschlüssen, für die hierzulande hergestellten Verbundisolatoren konsequent eingesetzt und verfeinert, so dass man heute über ausreichende Erfahrungen mit diesem Material unter verschiedenen Bedingungen verfügt.

Ausserordentlich positiv für Silikon sind auch Ergebnisse aus einem neuen Langzeitversuch in der Freiluftprüfstation des Hochspannungsinstitutes der Technischen Hochschule Chalmers in Göteborg, Schweden [8, 9, 10]. Dort wurden seit 1980 Isolatoren verschiedener Hersteller aus Glas, Porzellan,

Silikon und EPDM unter Wechselspannung (800 kV) und Gleichspannung (600 kV) geprüft. Die Station liegt ungefähr 10 km vom Meer entfernt in einem flachen, ländlichen Gebiet und ist somit oft Salznebelverschmutzung, Nebel, Regen, Schnee und Eis ausgesetzt. Die Prüfstation ist voll computerisiert, so dass gleichzeitig Wetterparameter wie Windrichtung und -geschwindigkeit, Temperatur, Luftfeuchtigkeit, Luftdruck und Regenfall zusammen mit den Ableitströmen (und den Überschlägen) der Isolatoren registriert und ausgewertet werden. Die Vielzahl der bis heute gesammelten Daten ermöglicht einen quantitativen Vergleich des Betriebsverhaltens der verschiedenen Isolatortypen unter den erwähnten Bedingungen. Die Auswertung dieser Daten wurde in einem ausführlichen Bericht publiziert [10], mit folgenden Ergebnissen und Schlussfolgerungen:
- Verbundisolatoren aus EPDM und Silikon erlitten während der ersten

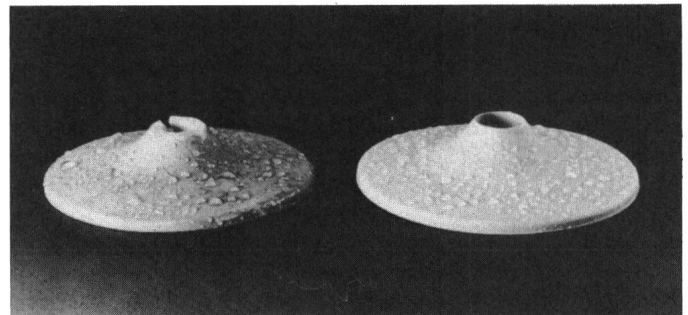
ist unter anderem folgendes festgestellt worden:

Isolatoren-Oberflächen aus Kunststoff sind wegen ihrer niedrigen Oberflächenspannung hydrophob, d.h. sie sind schwer zu benässen – das Wasser perlt an der Oberfläche (Bild 12) – und scheinen somit in diesem Zusammenhang den Oberflächen aus anorganischen Materialien wie Porzellan und Glas überlegen zu sein. Im Gegensatz dazu zeigt es sich bei der in [11] untersuchten EPDM-Isolatoren, dass, wenn sie den verschiedenen Umweltbeanspruchungen ausgesetzt sind, sich ihre chemische Zusammensetzung ändert, ihre Oberflächenstruktur modifiziert, ihre niedermolekulare Oberflächenschicht abträgt und ihre Oberflächenspannung nachteilig erhöht; mit anderen Worten: EPDM-Oberflächen verlieren ihre Hydrophobie, sie werden im Laufe der Zeit hydrophil.

Die festgestellte Langzeit-Hydrophobie der Silikonoberfläche wird im wesentlichen hervorgerufen durch die,

Bild 12
Wasserperlenbildung
auf Silikon-
isolatorschirmen

rechts:
neuer Silikon-
isolatorschirm
links:
im Betrieb gealterter
Silikonisolatorschirm



zwei Jahre des Versuches keine Überschläge. Sie waren den Glas- und Porzellanisolatoren unter allen Wetterbedingungen, inklusive extremer Salzstürme, überlegen.

- Das Verhalten von EPDM-Verbundisolatoren hat sich nach zwei Betriebsjahren sehr nachhaltig verändert. Sie zeigten in der anschliessenden Testzeit mehr Überschläge als die Porzellan und Glasisolatoren.

- Die Silikonisolatoren haben ihre überlegenen Eigenschaften während der gesamten 9jährigen Testperiode bewahrt. Die Isolatoren hatten keinen einzigen Überschlag während dieser Zeit.

Zur quantitativen Erklärung des besseren Verschmutzungsverhaltens der Silikonisolatoren wurden an der gleichen Hochschule weiterführende Untersuchungen eingeleitet [11]. Dabei

während der «Alterung» des Materials, ständige Diffusion von hoch- und niedermolekularen Bestandteilen an der Isolatorenoberfläche. Diese kontrollieren und unterbinden teilweise während der gesamten Betriebszeit des Isolators erfolgreich das Entstehen eines kontinuierlichen, leitfähigen Wasserfilmes, der letztlich für die Oberflächenentladungen und die Ableitströme verantwortlich ist. Diese positive Eigenschaft von Silikon wird zum grossen Teil auch nach kontinuierlichen Korona-Oberflächenentladungen beibehalten. Koronaentladungen könnten nämlich durch Trennung der Polymerketten, aber auch durch Quervernetzung und Oxidation der Oberflächenschicht, die Vernässungseigenschaften des Materials negativ beeinflussen. Die untersuchten Silikonisolatoren haben nach

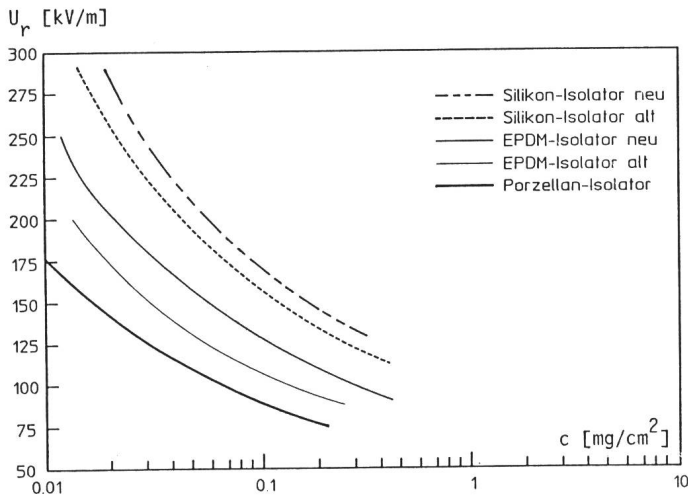


Bild 13
Überschlagswechselspannung in Abhängigkeit vom Salzgehalt für verschiedene Isolatormaterialien

U_r Überschlagswechselspannung pro m Kriechweg
 c Salzgehalt

Beendigung der Koronaentladungen ihre hydrophobischen Eigenschaften innerhalb kurzer Zeit wiederhergestellt; EPDM-Isolatoren dagegen blieben hydrophil. Besonders interessant war das Oberflächen-Verhalten von Silikon nach einer Salznebelverschmutzung und anschliessendem Aussetzen an Koronaentladungen. Man hat dabei beobachtet, wie, durch das oben erwähnte Ausscheiden von niedermolekularen Bestandteilen an der Silikonoberfläche, diese die Salzmoleküle einbinden und somit das Entstehen einer leitfähigen Fremdschicht an den Schirmen unterbinden.

Schliesslich soll in diesem Zusammenhang noch auf die vor kurzem bekannt gewordenen Versuchsergebnisse aus Kanada [12] über das Verschmutzungsverhalten von Hochspannungs-Verbundisolatoren und das Ausarbeiten von Empfehlungen für die Bemessung der Kriechstrecken von Silikon-, EPDM- und Porzellanisolatoren, eingegangen werden. Es handelt sich dabei um 115-kV-Verbundisolatoren verschiedener Hersteller, die in einer ersten Phase in einer Nebelkammer im Labor geprüft worden sind. Dabei wurde die relative Überschlagswechselspannung (in kV pro m Kriechstrecke) in Abhängigkeit vom Salzgehalt, im Bereich 0,04 ... 0,4 mg/cm² gemessen. Die Ergebnisse sind im Bild 13 eingetragen. Dort sind die Kurven für neue und im Betrieb gealterte EPDM- und Silikonisolatoren sowie, zum Vergleich, die Werte für eine Kette von Standard-Porzellankappenisolatoren (5,75" Durchmesser, Gesamtlänge 100 cm) eingetragen. Man sieht daraus, dass Verbundisolatoren aus EPDM le-

diglich 7/8, solche aus Silikon sogar nur 2/3 der für Porzellanisolatoren je nach Verschmutzungsgrad notwendigen Kriechstrecke benötigen, was auch durch frühere Untersuchungen [13] bestätigt wird. Es erhebt sich somit die Frage [13], ob es sinnvoll ist, für Verbundisolatoren die gleiche oder sogar eine grössere Kriechstrecke als für äquivalente Porzellanisolatoren vorzuschreiben, nachdem kürzere, aber elektrisch gleichwertige Verbundisolatoren zu beachtlichen Kostensparnissen sowohl bei neuen Leitungen (kürzere und leichtere Masten und Fundamente sowie grössere Spannweiten), als auch bei der Rehabilitation bestehender Leitungen (Netzspannungsanhebungen, Einsetzen von Seilen mit grösserem Durchgang und höherer Übertragungskapazität unter Beibehaltung der Bodenabstände) führen würde.

Die Verbundzone

Bei jedem Verbundisolator gibt es, je nach Produktionskonzept und Herstellungsverfahren, verschiedene Verbundzonen sowohl zwischen den einzelnen Komponenten des Isolators (Bild 1) als auch im eigentlichen Verbundwerkstoff, dem GFK-Stab. Bei allen diesen Zonen muss eine möglichst gute Haftung an der Grenzfläche der zusammenkommenden Materialien stattfinden, damit keine Hohlräume und somit im Betrieb keine Teilentladungen, die zu Alterung und Beschädigung der Isolierung führen können, stattfinden. Optimal ist dieses Problem bei den Silikonisolatoren der Sefag AG (Bilder 2, 3, 4, 5) gelöst:

Da das Silikon von sich aus nicht auf anderen Substraten haftet, wird vor dem Giessen der Silikonbeschirmung die Verbundfläche mit einem auf Silikonbasis funktionierenden Haftvermittler gleichmässig benetzt. Dadurch entsteht keine zusätzliche Schicht zwischen dem armierten Epoxydharzstab und der Silikonbeschirmung. In elektrischer und mechanischer Hinsicht treten somit keine Grenzflächen- und Zwischenschichtprobleme auf. Die Metallarmatur erhält im Bereich der Krafteinleitung ebenfalls die Beschirmung. Die hohe Elastizität des Silikonmaterials lässt unterschiedliche Längen- und Querausdehnungen der verwendeten Materialien zu. Auch die Hydrolysebeständigkeit des Isolators von der Stirnseite her ist langfristig gewährleistet. Es kann somit keine Feuchtigkeit in den Isolator eindringen und zu den bekannten negativen Auswirkungen auf den Glasfaserstab führen [14].

Prüfvorschriften

Nachdem der Einsatz von Verbundisolatoren weltweit eindeutig eine steigende Tendenz aufweist, ist auch der Bedarf der Anwender an allgemein anerkannten Prüfvorschriften und Empfehlungen gestiegen. IEEE hat schon 1975 eine Arbeitsgruppe ins Leben gerufen, die im Laufe der letzten Jahre entsprechende Guides und Standard-Technik-Berichte herausgegeben hat [15, 16, 17]. Zur gleichen Zeit startete ANSI (American National Standard Institute) mit dem Entwurf einer Prüfvorschrift, die Ende 1989 erschienen ist [18]. Auch im deutschsprachigen Raum existieren seit 1983 entsprechende DIN/VDE-Vorschriften [19]. Ein grosser Teil der in den obigen nationalen Vorschriften beinhalteten Prüfungen hat auch Eingang gefunden (zunächst über eine Cigré-Arbeitsgruppe, die eine Empfehlung ausgearbeitet hat) in eine entsprechende IEC-Vorschrift, die bald offiziell verabschiedet wird [20]. Für spezielle Anwendungen (z.B. Bahnen) existieren zudem nationale Normen sowie Herstellernormen, die generell ein hochwertiges Produkt und den Anwendern Sicherheit bei der Auswahl der richtigen Isolatortypen gewährleisten.

Schlussfolgerung

Nach fast 30jähriger, intensiver Entwicklung und fast ebenso langem, zum grössten Teil positivem Einsatz von

Verbundisolatoren stehen diese heute den Leitungsbauern für die verschiedensten Anwendungsfälle zur Verfügung. In manchen Ländern, insbesondere in Nordamerika, haben solche Isolatoren schon beachtliche Marktanteile erobert. In vielen anderen Ländern steht nach erfolgreichem Abschluss langjähriger Versuche in Testinstallationen ihr Einsatz unmittelbar bevor.

Es ist ein Hauptziel der Autoren dieses Aufsatzes, die interessierten Kreise in zusammengefasster Form über vor kurzem, hauptsächlich in der englischsprachigen Literatur publizierte, internationale Betriebserfahrungen mit Verbundisolatoren zu informieren und aus eigener Erfahrung in Entwicklung, Herstellung und konkreten Anwendungen in der Schweiz über den heutigen Stand der Technik bezüglich Materialeigenschaften und Prüfverfahren von Verbundisolatoren zu berichten. Verbundisolatoren genügen heute qualitativ den höchsten Anforderungen und bieten sich in vielen Fällen für eine wirtschaftliche Lösung an. Dies gilt vor allem dann, wenn Einsparungen in den Betriebskosten durch reduzierte Reinigungskosten, minimale Kriechstromverluste usw. mitberücksichtigt werden.

Literatur

- [1] *H. Dietz e. a.*: Derniers développements et expériences sur les isolateurs composites long fût. Rapport Cigré 15-09, 1986.
- [2] L'expérience en service des isolateurs composite HT dans le monde. *Electra* - (1990)130, p. 68...77.
- [3] *H.M. Schneider* a. o.: Nonceramic insulators for transmission lines. *IEEE Trans. on Power Delivery* 4(1989)4, p. 2214...2221.
- [4] *C.H. de Tourreil*: Response of composite insulators to dynamical loads. *IEEE Trans. on Power Delivery* 5(1990)1, p. 379...383.
- [5] *J. Lanteigne* a. o.: Mechanical rating scheme for polymer distribution post insulators. CEA-Report No. 004 D 458. Montreal Canadian Electrical Association, July 1988.
- [6] *R. Spaude*: Korrosion und Alterung von Glasfasern und glasfaserverstärkten Duroplasten. Dissertation der Universität-Gesamthochschule Kassel, 1984.
- [7] *K.O. Papailiou*: Silikon in der Hochspannungstechnik. *Bull. SEV/VSE* 81(1990)15, S. 33...37.
- [8] *A. E. Vlastós* and *E. Sherif*: Experience from insulators with RTV silicon rubber and shed coatings. Paper 89 WM 120-7 PWRD. IEEE Power Energy Society Winter Meeting, 1989.
- [9] *A. E. Vlastós* and *E. Sherif*: Natural ageing of EPDM composite insulators. *IEEE Trans. on Power Delivery* 5(1990)1, p. 406...414.
- [10] *E.M. Sherif*: Performance and ageing of HVAC and HVDC overhead line insulators. Technical Report No, 169. Göteborg, Chalmers University of technology, 1987.
- [11] *S.M. Gubanski* and *A.E. Vlastós*: Wettability of naturally aged silicon and EPDM composite insulators. Paper 90 WM 025-7 PWRD. IEEE Power Engineering Society Winter Meeting, 1990.
- [12] *J.N. Edgar* a. o.: Assessment of the contamination performance of transmission class composite insulators using the clean fog test procedure. CEA-Report. Montreal, Canadian Electrical Association, 1990.
- [13] Electrical testing of composite insulators at CERL's outdoor facility, Brighton. Final Report for CEA Contract 171.T344. Montreal, Canadian Electrical Association, October 1988.
- [14] *A. Bradwell*: Importance of preventing moisture ingress to polymeric insulators. *IEEE Proc. Part. B: Electric Power Applications* 131(1984)6, p. 245...251.
- [15] *E.A. Cherney* a. o.: Application of composite insulators to transmission lines. *IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems* 102 (1983)5, p. 1226...1234.
- [16] *E. A. Cherney* a. o.: Minimum test requirements for non-ceramic insulators. *IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems* 100(1981)2, p. 882...890.
- [17] Guide for application of composite insulator ANSI/IEEE Standard 987-1985.
- [18] Standard for composite suspension insulators for overhead transmission line tests. ANSI Standard C 29.11-1989).
- [19a] Prüfung von Kunststoff-Isolatoren für Betriebswechselspannungen über 1 kV. Prüfung von Werkstoffen für Freiluftisolatoren. DIN/VDE 0441 Teil 1/Juli 1985.
- [19b] Prüfung von Kunststoff-Isolatoren für Betriebswechselspannungen über 1 kV. Prüfung von Freiluft-Verbundisolatoren mit glasfaserverstärktem Kern. DIN 57441, Teil 2/VDE 0441 Teil 2/10.82.
- [20] Essais des isolateurs composites destinés aux lignes aériennes à courant alternatif de tension nominale supérieure à 1000 V. Projet. CEI-Règle de six mois 36 Bureau Central 71, novembre 1988.