

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Vorteile und Entwicklung von Verbundisolatoren	1
1.2	Erfahrungen mit Verbundisolatoren	2
1.3	Einsatz von Verbundisolatoren in Hochspannungsfreileitungen	5
1.4	Einsatz von Verbundisolatoren bei elektrischen Apparaten und Freiluftschaltanlagen	6
1.5	Stand der Normung	8
	Literaturverzeichnis	8
2	Verbundlangstabisolatoren	9
2.1	Anwendungen von Verbundlangstabisolatoren	9
2.2	Das Verhalten von Verbundlangstabisolatoren unter mechanischer Beanspruchung	12
2.2.1	Die Dauerstandfestigkeit von Verbundlangstabisolatoren	13
2.2.1.1	Die Dauerkraftkurve von Verbundisolatoren nach IEC 61109/92	17
2.2.1.2	Mechanisches Modell für das Langzeitverhalten von Verbundisolatoren	19
2.3	Verhalten von Verbundlangstabisolatoren bei dynamischer Belastung	23
2.4	Auslegung und Montage von Endarmaturen für Verbundlangstäbe	27
2.4.1	Entwicklung und Stand der Technik der Metallarmaturen	27
2.4.2	Grundsätzliche Überlegungen zu der Auslegung von Pressarmaturen	28
2.4.3	Montagetechnik von Pressarmaturen	30
2.4.4	Berechnungssystematik	31
2.4.5	Einfache analytische Methode	32
2.4.6	Komplexe analytische Methode	33
2.4.6.1	Verpressung	35
2.4.6.2	Relaxation	39
2.4.6.3	Zugbelastung/Pull-out	39

2.4.7	Numerische Simulationsmethoden	40
2.4.7.1	Finite Elemente Modellierung	41
2.4.7.2	Rechenergebnisse der Simulation	41
2.4.7.3	Ergebnisse der numerischen Simulation beim Versagen	43
2.4.7.4	Versuchsergebnisse	44
2.4.7.5	Sensitivitätsanalyse	47
2.5	Formelzeichen und Abkürzungen	49
	Literaturverzeichnis	51
3	Verbundstützisolatoren	53
3.1	Wesentliche Eigenschaften	53
3.2	Anwendungen von Verbundstützisolatoren	54
3.3	Das Verhalten von Verbundstützisolatoren unter Biegung	58
3.3.1	Allgemeines	58
3.3.2	Einführung einer Schadensgrenze (damage limit)	59
3.3.2.1	Versuche zur Bestimmung der Schadensgrenze	61
3.3.2.2	Versuch zur Bestimmung der maximalen Betriebsbiegelast (MDCL)	65
3.3.2.3	Bestimmung der MDCL und der CFL im gleichen Versuch	66
3.4	Herstellerangaben zum SCL/MDCL Konzept	66
3.5	Das sichere Verhalten beim Versagen von Verbundstützern	67
3.6	Kombinierte Belastungen	71
3.6.1	Lastdiagramme	72
3.6.2	Beispiele	73
3.6.2.1	Horizontale Lage des Isolators	73
3.6.2.2	Isolator bildet einen Winkel von $\beta = 15^\circ$ zur Horizontalen	74
3.6.3	Computersimulation	75
3.6.4	Versuche	75
3.7	Dynamische Belastungen	75
3.7.1	Prüflinge	76
3.7.2	Prüfverfahren	76
3.7.3	Versuchsergebnisse	76
3.8	Konstruktive Anforderungen der Endarmaturen	77
3.9	Analytische Berechnungsmethoden	79
3.9.1	Einfache analytische Methode	80
3.9.2	Komplexe analytische Methode	81
3.9.2.1	Radiale Druckspannung an der Öffnung der Metallarmatur	82
3.9.2.2	Normalspannung im GFK-Stab innerhalb der Metallarmatur	82
3.9.2.3	Schubspannung in der neutralen Achse des Stabes	83
3.10	Numerische Simulation	84

3.10.1	Finite Elemente Model	85
3.10.2	Versuchsanordnung	86
3.11	Das Versagensverhalten von Verbundstützisolatoren	88
3.12	Sensitivitätsanalyse	92
3.13	Formelzeichen und Abkürzungen	93
	Literaturverzeichnis	95
4	Isoliertraversen für Kompaktleitungen	97
4.1	Einleitung	97
4.2	Grundsätze der Kompaktierung	98
4.2.1	Einfluss der Seilaufhängung auf das Mastbild	98
4.2.2	Möglichkeiten der Leitungskompaktierung	98
4.2.2.1	V-Ketten	99
4.2.2.2	Leitungsstützer (horizontal)	99
4.2.2.3	Abgehängter Leitungsstützer	100
4.2.2.4	Isoliertraverse	101
4.3	Die mechanische Auslegung von Isoliertraversen	102
4.3.1	Die starr gelagerte Isoliertraverse	104
4.3.2	Die gelenkig gelagerte Isoliertraverse (horizontal-V)	106
4.3.3	Dynamische Belastungen	111
4.3.4	Stabilitätsuntersuchungen	113
4.4	Innovative Anwendungen von Kompaktleitungen	120
4.4.1	400 kV Leitung mit Hohlkörperisolatoren in der Schweiz	120
4.4.2	Notgestänge mit Verbundisolatoren	121
4.4.3	420 kV Doppelleitung mit Vollkernverbundtraversen	123
4.5	Formelzeichen und Abkürzungen	124
	Literaturverzeichnis	125
5	Phasenabstandshalter	127
5.1	Einleitung	127
5.2	CIGRE Umfrage	128
5.2.1	Auswertung Fragebogen	128
5.2.2	Betriebserfahrungen	131
5.3	Anschlusstechnik	131
5.4	Mechanische Auslegung von Phasenabstandshaltern	134
5.4.1	Galloping	134
5.4.1.1	Galloping Amplituden	134
5.4.1.2	Bauweisen	135
5.4.1.3	Einbauempfehlungen	136
5.4.1.4	Belastungen der PAH durch Galloping	139
5.4.2	Abwurf von Eislasten	141
5.4.2.1	Stoßkräfte auf die PAH	141
5.4.3	Elektrodynamische Kurzschlusskräfte	143
5.4.4	Das Knickverhalten von Phasenabstandshaltern	147

5.5	Elektrische Auslegung von Phasenabstandshaltern	152
5.5.1	Mindestlänge	152
5.5.2	Koronaeffekte	153
5.5.3	Verschmutzung	154
5.6	Anwendungen	155
5.6.1	Kompaktleitung für Mittelspannung	155
5.6.2	Phasenabstandshalter gegen Seiltanzen durch Eisabwurf ...	156
5.6.3	Der Tennisschlägermast	159
5.7	Formelzeichen und Abkürzungen	160
	Literaturverzeichnis	162
6	Verbundhohlisolatoren	163
6.1	Haupteigenschaften von Verbundhohlisolatoren	163
6.1.1	Verbundisolatoren in Freiluftschaltanlagen	164
6.1.1.1	Durchführungen	164
6.1.1.2	Überspannungsableiter	166
6.1.1.3	Freiluftendverschlüsse für Kunststoffkabel	167
6.1.1.4	Strom- und Spannungswandler	167
6.1.1.5	Freiluftleistungsschalter	169
6.1.2	GFK-Rohr	169
6.1.3	Endarmaturen	169
6.1.4	Das mechanische Verhalten von Verbundhohlisolatoren bei der Biegung	170
6.1.4.1	Versagensmechanismen und diagnostische Methoden von Verbundhohlisolatoren	170
6.1.4.2	Das Konzept der „Schadensgrenze“ bei Verbundhohlisolatoren	171
6.2	Prüfung von Verbundhohlisolatoren	173
6.2.1	Definitionen der Lasten	173
6.2.2	Biegebelastungen	174
6.2.3	Drucklasten	175
6.2.4	Beispiele aus der Versuchspraxis nach IEC 61462	177
6.2.4.1	Hohlkörperisolator für einen 145 kV Überspannungsableiter	177
6.2.4.2	Hohlkörperisolator für eine 500 kV Durchführung	179
6.3	Mechanische Auslegung von Verbundhohlisolatoren	180
6.3.1	Einfache analytische Methode	181
6.3.1.1	Dimensionierung des GFK-Rohres	182
6.3.1.2	Auslegung der Verbindungselemente zum Unterbau	182
6.3.2	Numerische Simulationsmethoden	183
6.3.2.1	Finite Elemente Modellierung der Verbund/Metallverbindung	183
6.3.2.2	Numerische Simulation des inneren Spannungszustandes	185

6.3.2.3	Experimentelle Überprüfung der Simulation	186
6.4	Formelzeichen und Abkürzungen	189
	Literaturverzeichnis	190
7	Materialauswahl und Herstellungsverfahren für Verbundisolatoren mit Silikongummimantel	191
7.1	Einleitung	191
7.2	Komponenten/Halbzeuge für Verbundisolatoren	192
7.2.1	Armaturen	192
7.2.2	Innere Isolierung	194
7.2.2.1	Stab	194
7.2.2.1.1	Materialien	194
7.2.2.1.1.1	Glasfaser	194
7.2.2.1.1.2	Harz	198
7.2.2.1.1.3	Wahl der Glasfaser und des Harzsystems	199
7.2.2.1.1.4	Eigenschaftskoordination zwischen Glasfaser und Harz	203
7.2.2.1.2	Verfahren zur Stabherstellung	203
7.2.2.1.3	Qualitätskontrolle	206
7.2.2.2	Rohr	208
7.2.2.2.1	Materialien und Verfahren	208
7.2.2.2.2	Qualitätskontrolle	212
7.2.3	Äußere Isolierung – Silikongummitypen für den Isoliermantel	212
7.2.3.1	Herstellung von Silikongummi	212
7.2.3.2	Bezeichnung, Kategorisierung von Silikongummi	213
7.2.3.3	Einsatz von ATH als Füllstoff	220
7.2.3.3.1	Erhöhung der Erosions- und Kriechspurbeständigkeit	220
7.2.3.3.2	Einfluss auf die Hydrophobiebeständigkeit	223
7.2.3.3.3	Einfluss auf das Recovery-Verhalten	226
7.2.3.3.4	Einfluss auf den Hydrophobie-Transfer	229
7.2.3.3.5	Einfluss auf die Säurebeständigkeit	232
7.2.3.4	Zusammenfassende Gegenüberstellung	233
7.3	Verfahren	234
7.3.1	Armieren	234
7.3.1.1	Stabarmieren	234
7.3.1.1.1	Vorgang	234
7.3.1.1.2	Qualitätssicherung – Akustische Emissionsanalyse (AE)	235
7.3.1.2	Rohrarmieren	241

7.3.1.2.1	Vorgang	241
7.3.1.2.2	Qualitätssicherung	241
7.3.2	Aufbringen des Isoliermantels und der Dichtung	241
7.3.2.1	Verfahrensüberblick für Isoliermantel	241
7.3.2.1.1	Niederdruckformbefüllungsverfahren für RTV-2 und LSR	241
7.3.2.1.2	Hochdruckverfahren für HTV	245
7.3.2.1.2.1	Traditionelle Verfahren ...	245
7.3.2.1.2.2	Automatisiertes kontinuierliches Spritzgießen (ACIM)	248
7.3.2.1.3	Extrusionsverfahren	249
7.3.2.1.4	Modular-Verfahren	250
7.3.2.1.5	Zusammenfassender Überblick zu den Verfahren	254
7.3.2.1.5.1	Vollkernisolatoren	254
7.3.2.1.5.2	Hohlisolatoren	255
7.3.2.2	Qualitätssicherung	256
7.3.2.3	Dichtungssysteme	257
7.3.2.3.1	Verfahrensabhängigkeit	257
7.3.2.3.1.1	Prinzipielle Dichtungssysteme	257
7.3.2.3.1.2	Koronaschirm als innovative flexible Dichtungslösung	258
7.3.2.3.2	Feldbetrachtungen	259
7.4	Zusammenfassung	262
7.5	Formelzeichen und Abkürzungen	262
	Literaturverzeichnis	264
8	Zur Auslegung von Verbundisolatoren aus Sicht des Koronaschutzes	271
8.1	Einleitung	271
8.2	Korona als Designproblem – aktuelle Beispiele	272
8.2.1	Nennspannung 525 kV – Doppelabspannkette am Gittermast	273
8.2.2	Nennspannung 245 kV – Doppelabspannkette am Stationsportal	275
8.2.3	Nennspannung 115/138/145 kV – verschiedene Kettenaufbauten	277
8.3	Analyse des elektrischen Feldes von im Betrieb befindlichen Verbundisolatorketten	279
8.4	Stand der Normung	280
8.5	Wassertropfenkorona auf hydrophoben Mantelwerkstoffen	284
8.5.1	Entstehung von Wassertropfenkorona	284
8.5.2	Wirkung von Korona auf polymeren Oberflächen	288
8.5.3	Schädigungspotential durch Korona	298

8.6	Ergänzende Anforderungen für Verbundisolatoren (oder mit Verbundisolatoren zusammengestellten Ketten)	298
8.6.1	Material- und Geometrieunterschiede	298
8.6.2	Berechnung der elektrischen Feldstärke	300
8.7	Empirische Grenzwerte für Korona	312
8.8	420 kV-Ketten nach 10-jähriger Betriebszeit	313
8.8.1	Überspritztes Design	313
8.8.2	Modulares Design	315
8.9	Zusammenfassung	318
8.10	Formelzeichen und Abkürzungen	319
	Literaturverzeichnis	320
9	Lichtbogenschutzarmaturen für Verbundlangstabisolatoren	323
9.1	Einleitung	323
9.2	Der Lichtbogen als physikalische Erscheinung	323
9.2.1	Ursachen für den Überschlag einer Verbundisolatorenkette ..	323
9.2.2	Der Lichtbogen	324
9.2.3	Prinzipien des Lichtbogenschutzes	326
9.3	Wirkungen des Lichtbogens	330
9.3.1	Porzellan- und Glasisolatoren	330
9.3.2	Verbundisolatoren	333
9.3.3	Zusammenfassender Vergleich der Wirkungen	335
9.3.4	Peripherieschutz	335
9.4	Gestaltung von Lichtbogenschutzarmaturen	337
9.4.1	Materialauswahl	337
9.4.2	Dichte des Fehlerstromes in den Elementen einer Isolator- kette	340
9.5	Prüfungen des Lichtbogenschutzes	341
9.5.1	Materialprüfung des Mantelwerkstoffs (Designtest)	341
9.5.2	Kettenprüfung aus Sicht der Stromdichte – Kurzschlussversuch	344
9.5.3	Kettenprüfung aus Sicht der Lichtbogenwirkung – Lichtbogen- test	345
9.6	Ausgewählte Beispiele aus Projekten	347
9.6.1	Fehlanswendung von Lichtbogenschutzarmaturen von Kappen- isolatorenketten für Verbundisolatorenketten ...	347
9.6.2	Koordination von Koronaring und Lichtbogenschutzarmatur	350
9.6.3	Direktbefestigung von Lichtbogenschutzarmaturen auf Armaturen von Verbundisolatoren	351
9.6.4	Einfluss des Kettendesigns am Mast	354
9.7	Zusammenfassung	357
9.8	Formelzeichen und Abkürzungen	357
	Literaturverzeichnis	358

10 Zur Laborbewertung von Verbundisolatoren nach deren Entnahme aus dem Netz	361
10.1 Einleitung	361
10.1.1 Ist die Bewertung von Verbundisolatoren notwendig?	362
10.1.2 Interfacebereiche als wesentlicher Unterschied von Verbundisolatoren	362
10.2 Ursachen für die Bewertung von Verbundisolatoren nach der Entnahme aus dem Netz	363
10.2.1 Bewertung eines eingebauten Isolatorenbestandes hinsichtlich des Alterungszustandes	363
10.2.2 Bewertung eines Isolatorausfalls oder eines Isolatortyps mit hohem Ausfallrisiko	363
10.2.3 Bewertung von Verbundisolatoren für Forschungszwecke	365
10.3 Ausfallrate/Ausfälle von Verbundisolatoren	366
10.3.1 USA/EPRI	366
10.3.2 CIGRE Umfrage, publiziert im Jahr 2000	367
10.3.3 Betriebserfahrungen in China	369
10.4 Allgemein angewandte Prüfstrategien	371
10.4.1 Identifikation der Prüflinge	371
10.4.2 Reihenfolge der Prüfungen	371
10.4.2.1 Visuelle Bewertung	372
10.4.2.2 Mechanische Bewertung	381
10.4.2.3 Elektrische Bewertung	381
10.4.2.4 Materialanalyse	383
10.4.2.4.1 Mantelwerkstoffe	384
10.4.2.4.2 Stabmaterial	385
10.4.2.4.3 Armaturen	385
10.4.2.4.4 Mantelwerkstoff-Finger-Print	385
10.4.2.5 Fremdschichtanalyse	385
10.4.2.5.1 Fremdschichtanlagerung	386
10.4.2.5.2 Oberflächenveränderungen	386
10.4.2.5.3 Benetzungsklasse	386
10.4.2.5.4 Wirksamkeit des Hydrophobie-Transfer-Mechanismus (HTM)	386
10.4.2.5.5 Hydrophobie-Transfer (HT)	387
10.4.3 Zusammenfassung zur Auswahl von Prüfverfahren und Ausfallkriterien	387
10.5 Beispiele für Prüfprogramme und deren Ergebnisse	388
10.5.1 Beispiel 1 – 420 kV-Verbundisolator (gesteppte Spritzgussvariante) nach 10-jährigem Einsatz	388
10.5.1.1 Prüflinge und Teststrategie	388
10.5.1.2 Ergebnisse und Diskussion	389
10.5.1.2.1 Hydrophobie	389
10.5.1.2.2 Prüfung der Nennkraft (SML) und Grenzkraft	391

10.5.1.2.3	Interfaceprüfungen	393
10.5.1.2.3.1	Mikroskopische Bewertung und REM-Analyse	393
10.5.1.2.3.2	Kochtest und Steilstoßprüfung	394
10.5.1.2.3.3	Farbeindringprüfung	395
10.5.1.2.3.4	Schiefe-Ebene-Test	395
10.5.1.3	Ergebniszusammenfassung	397
10.5.2	Beispiel 2 – 420 kV Verbundisolator (Modularvariante) nach 10-jährigem Einsatz	398
10.5.2.1	Prüflinge	398
10.5.2.2	Visuelle Bewertung	399
10.5.2.3	Prüfprogramm	399
10.5.2.4	Ergebnisse und Diskussion	399
10.5.2.4.1	Hydrophobie-Bewertung	399
10.5.2.4.2	Bewertung der Dichtung	402
10.5.2.4.3	Haftungsprüfung	403
10.5.2.4.4	96-Stunden-Zugbelastung mit 75 % SML und Grenzlastprüfung	404
10.5.2.4.5	Verzinkungsprüfung	404
10.5.2.4.6	Farbeindringprüfung (IEC 61109)	405
10.5.2.4.7	Grenzlastprüfung ohne Vorbelastung (IEC 61109)	405
10.5.2.5	Zusammenfassendes Ergebnis	406
10.5.3	Beispiel 3 – 15 kV-Verbundisolator nach 15-jährigem Einsatz im Tunnelbahnbetrieb	406
10.5.3.1	Prüflinge und Prüfprogramm	406
10.5.3.2	Ergebnisse und Diskussion	407
10.5.3.2.1	Fremdschichtmessungen	407
10.5.3.2.2	Modifizierte Klarnebelprüfung	407
10.5.3.2.3	Grenzbiegekraftprüfung	409
10.5.3.3	Zusammenfassung	410
10.5.4	Beispiel 4 – Analyse von Verzinkungsdicken und Hydrophobiewirkung nach 30-jährigem 15 kV- Tunnelbahnbetrieb	411
10.5.4.1	Vorgehensweise	411
10.5.4.2	Visuelle Beobachtungen	412
10.5.4.3	Ergebnisse und Diskussion	413
10.5.4.3.1	Zinkschichtdicke	413
10.5.4.3.2	Fremdschichtanalyse	414
10.5.4.4	Zusammenfassung	415
10.5.5	Beispiel 5 – Bewertung von 123 kV-Isolatoren zur Produktqualifikation	416
10.5.5.1	Prüflinge	416

10.5.5.2	Prüfprogramm	416
10.5.5.2.1	Inspektion der Verbundisolatoren am Versuchsmast	416
10.5.5.2.2	Quick-Salznebelprüfung	417
10.5.5.2.3	Bewertung des Interface-Isoliervermögens	417
10.5.5.3	Ergebnisse und Diskussion	417
10.5.5.3.1	Inspektion am Versuchsmast	417
10.5.5.3.2	Quick-Salznebelprüfung	419
10.5.5.3.3	Interface-Isoliervermögen	419
10.5.5.4	Schlussfolgerung	420
10.5.6	Beispiel für die Ableitung von Zuverlässigkeitszahlen	420
10.5.6.1	Erfahrungswerte	420
10.5.6.1.1	Betriebserfahrung mit Verbundisolatoren	420
10.5.6.1.2	Betriebserfahrung mit Porzellanisolatoren	421
10.5.6.2	Getroffene Annahmen	421
10.5.6.3	Statistisch-mathematische Berechnung	421
10.6	Zusammenfassung	422
10.7	Formelzeichen und Abkürzungen	423
	Literaturverzeichnis	424

11 Eine Übersicht zur Normung und zur Prüfung

	von Verbundisolatoren	429
11.1	Einleitung	429
11.2	Stand der IEC-Normung von Verbundisolatoren und Gemeinsamkeiten im Vergleich zu konventionellen Isolatoren und Isolatorenketten	431
11.3	Spezialprüfungen für Flammbeständigkeit	433
11.4	Prüfverfahren zur Bewertung bestimmter Eigenschaften	433
11.5	Schiefe-Ebene-Test	437
11.5.1	Erosions- und Kriechspurbeständigkeit	437
11.5.1.1	Einflussfaktoren auf das Prüfergebnis	437
11.5.1.1.1	Einfluss der Prüfkörperhalterung	437
11.5.1.1.2	Einfluss der Elektrodenrauheit	438
11.5.1.1.3	Einfluss der Spannungsquelle	439
11.5.1.1.4	Einfluss des Stichprobenumfanges	443
11.5.1.2	Prüfung von Silikongummi-Coatings	444
11.5.1.3	Prüfung im Rahmen intensivierter Abnahmeprüfungen	446
11.5.1.4	Prüfungen mit Gleichspannung	447
11.5.2	Schiefe-Ebene-Test-Prinzip zur Bewertung der Hydrophobie-Beständigkeit	448

11.5.3 Schiefe-Ebene-Test-Prinzip zur Bewertung des Hydrophobie-Transfers	450
11.6 Finger-Print-Analyse von polymeren Mantelwerkstoffen	452
11.6.1 Hintergrund	452
11.6.2 Übersicht der Verfahren	453
11.6.3 Details zu den Verfahren und Beispiele	453
11.6.3.1 Dichte- und Härtemessung	453
11.6.3.2 Dynamische Differenzkalorimetrie	454
11.6.3.3 Thermogravimetrische Analyse	455
11.6.3.4 Fourier-Transform-Infrarot-Spektroskopie	457
11.6.3.5 Mechanische Materialprüfung	458
11.7 Zusammenfassung	458
11.8 Formelzeichen und Abkürzungen	460
Literaturverzeichnis	461
Sachverzeichnis	465