

1	Einleitung	1
1.1	Vorteile und Entwicklung von Verbundisolatoren	1
1.2	Erfahrungen mit Verbundisolatoren	3
1.3	Einsatz von Verbundisolatoren in Hochspannungsfreileitungen	6
1.4	Einsatz von Verbundisolatoren in elektrischen Geräten und Freiluftschaltanlagen	7
1.5	Stand der CIGRE-Arbeit und der IEC-Normung	9
	Literatur	10
2	Materialauswahl für Verbundisolatoren mit Silikongummimantel	11
2.1	Einleitung	11
2.2	Armaturen	15
2.2.1	Stand der Technik	15
2.2.2	Qualitätsaspekte	17
2.2.3	Korrosionsschutz	20
2.2.4	Armaturen für niedrige Temperaturen	23
2.3	Innere Isolierung – Stab	25
2.3.1	Glasfaser	25
2.3.2	Harzsystem	28
2.3.3	Wahl der Glasfaser und des Harzsystems	31
2.3.4	Eigenschaftskoordination zwischen Glasfaser und Harzmatrix	35
2.3.5	Etablierte Verfahren zur Stabherstellung	36
2.3.6	Weiterentwicklung der Pultrusion zur Stabherstellung	40
2.3.7	Spezialprofile	46
2.3.8	Qualitätskontrolle	48
2.3.9	Anwendungsorientierte Kennzahlen	51
2.4	Innere Isolierung – Rohr	52
2.4.1	Materialien und Verfahren	52
2.4.2	Spezialanwendung	57

2.4.3	Qualitätskontrolle	62
2.4.4	Anwendungsorientierte Kennzahlen	63
2.5	Äußere Isolierung – Silikongummitypen für den Isoliermantel.	63
2.5.1	Herstellung von Silikongummi.	63
2.5.2	Bezeichnung, Kategorisierung von Silikongummi.	65
2.5.3	Einsatz und Wirkung von ATH-Füllstoff	69
2.5.4	Ausgewählte betriebsrelevante Materialeigenschaften	71
2.5.4.1	Beständigkeit gegen Erosion und Kriechspurbildung	72
2.5.4.2	Einfluss auf die dynamischen Hydrophobieeigenschaften	77
2.5.4.3	Einfluss auf die Säurebeständigkeit.	100
2.5.5	Biogene Einflüsse – Wirkungen und Abhilfe beim Auftreten biogener Fremdschichten	105
2.5.5.1	Biogene Fremdschichten im Betrieb.	105
2.5.5.2	Biogene Fremdschichten während Laborprüfungen mit Feuchtigkeit	114
2.5.6	Vogel-Einflüsse im Betrieb und Abhilfen.	121
2.5.6.1	Vogelfraß	121
2.5.6.2	Bird Streamer [220–222, 224, 225].	121
2.5.7	Zusammenfassende Gegenüberstellung der Silikongummitypen	129
2.6	Werkstoffmechanik.	129
2.6.1	Materialeigenschaften vom GFK-Stab.	131
2.6.1.1	Das Spannungs-Dehnungs-Verhalten des GFK-Stabes.	131
2.6.1.2	Prüfverfahren für die Materialparameter und die Festigkeitseigenschaften des Stabes.	134
2.6.1.3	Mischungsregel	138
2.6.1.4	Elastizitätsmodul in Faserrichtung	141
2.6.1.5	Abschätzung der Stab-Festigkeit.	142
2.6.2	Versagensarten und Schädigungsverhalten	142
2.6.2.1	Versagenskriterien	143
2.6.2.2	Linearisierungsansatz für das Versagenskriterium von Verbundisolatoren.	146
2.6.2.3	Das Versagenskriterium für querisotrope Werkstoffe	147
2.6.2.4	Experimentelle Bestimmung der Wechselwirkungsfaktoren	150
2.6.2.5	Festigkeits- und Wechselwirkungsfaktoren für einen typischen GFK–Stab	152

	2.6.2.6	Gefährdungsindex und Risikofaktor für querisotrope Materialien	153
	2.6.2.7	Bruchmechanik von GFK-Stäben	154
	2.6.3	Armaturen – Materialeigenschaften	157
	2.6.4	Wechselwirkung vom GFK-Stab mit der Armatur	157
	2.6.5	Silikonelastomer	160
	2.7	Zusammenfassung	162
	2.8	Formelzeichen und Abkürzungen	162
		Literatur	165
3		Herstellungsverfahren für Verbundisolatoren	179
	3.1	Einleitung	179
	3.2	Stabarmieren	179
	3.2.1	Vorgang	179
	3.2.2	Qualitätssicherung – Akustische Emissionsanalyse (AE)	182
	3.3	Rohrarmieren	189
	3.3.1	Vorgang	189
	3.3.2	Qualitätssicherung	189
	3.4	Verfahren zum Aufbringen des Isoliermantels	190
	3.4.1	Niederdruckformbefüllungsverfahren für RTV-2 und LSR	190
	3.4.2	Hochdruckverfahren für HTV	195
	3.4.2.1	Traditionelle Verfahren und Werkzeugtechnik	195
	3.4.2.2	Automatisiertes kontinuierliches Spritzgießen für Stabisolatoren (ACIM)	203
	3.4.2.3	Automatisiertes kontinuierliches Spritzgießen für Hohlisolatoren (Albisser-Verfahren)	204
	3.4.2.4	Extrusionsverfahren	207
	3.4.2.5	Modularverfahren	208
	3.4.3	Entformungsverhalten	212
	3.5	Zusammenfassender Überblick zu den Herstellungsverfahren	214
	3.5.1	Vollkernisolatoren	214
	3.5.2	Hohlisolatoren	214
	3.5.3	Dichtungssysteme	214
	3.5.3.1	Prinzipielle Dichtungssysteme	214
	3.5.3.2	Koronaschirm als innovative flexible Dichtungslösung	220
	3.5.4	Qualitätssicherung	224
	3.6	Zusammenfassung	228
	3.7	Formelzeichen und Abkürzungen	229
		Literatur	230

4	Zur Auslegung von Verbundisolatoren aus Sicht des Koronaschutzes	233
4.1	Einleitung	233
4.2	Beispiele für Koronaprobleme in Installationen.	235
4.2.1	Beispiel einer 525-kV-Doppelabspannkette am Gittermast	236
4.2.2	Beispiel einer 245-kV-Doppelabspannkette an einem Stationsportal	237
4.2.3	Beispiele für 115/138/145-kV-Isolatorketten mit verschiedenen Kettenaufbauten	240
4.3	Stand der Normung	243
4.4	Analyse des elektrischen Feldes von im Betrieb befindlichen Verbundisolatorketten.	247
4.5	Wassertropfenkorona auf hydrophoben Mantelwerkstoffen	248
4.5.1	Entstehung von Wassertropfenkorona	248
4.5.2	Wirkung von Korona auf polymeren Oberflächen, speziell Silikongummi	253
4.5.2.1	Bildung verschiedener Sauerstoff-Spezies	257
4.5.2.2	Bildung von Salpetersäure.	258
4.5.3	Schädigungspotential durch Korona.	262
4.5.4	Experimentelle Bestimmung von Wassertropfenkorona an Isolatorketten	263
4.6	Ergänzende Anforderungen für Verbundisolatoren (oder mit Verbundisolatoren zusammengestellten Ketten)	264
4.6.1	Material- und Geometrieunterschiede	264
4.6.2	Berechnung der elektrischen Feldstärke.	267
4.6.2.1	Berechnungsmethoden	267
4.6.2.2	Parameter zur Optimierung der elektrischen Feldsteuerung am Verbundisolator	275
4.6.2.3	Ganzzeitliche Berechnung elektrischer Feldstärken an Isolatorketten.	282
4.7	Empirische Grenzwerte für die Koronavermeidung.	291
4.8	420-kV-Ketten nach 10-jähriger Betriebszeit.	292
4.8.1	Überspritztes Design	292
4.8.2	Modulares Design.	296
4.9	Zusammenfassung	299
4.10	Formelzeichen und Abkürzungen.	300
	Literatur.	302

5	Lichtbogenschutzarmaturen für Verbundlangstabilisatoren	307
5.1	Einleitung	307
5.2	Der Lichtbogen als physikalische Erscheinung	308
5.2.1	Ursachen für den Überschlagn einer Verbundisolatorenkette	308
5.2.2	Der Lichtbogen	308
5.2.3	Prinzipien des Lichtbogenschutzes	312
5.3	Wirkungen des Lichtbogens	320
5.3.1	Porzellan- und Glasisolatoren	320
5.3.2	Verbundisolatoren	321
5.3.3	Zusammenfassender Vergleich der Wirkungen	323
5.3.4	Peripherieschutz	325
5.4	Gestaltung von Lichtbogenschutzarmaturen	326
5.4.1	Materialauswahl	326
5.4.2	Dichte des Fehlerstromes in den Elementen einer Isolator-kette	329
5.5	Prüfungen des Lichtbogenschutzes	330
5.5.1	Materialprüfung des Mantelwerkstoffs (Designtest)	330
5.5.2	Kettenprüfung aus Sicht der Stromdichte – Kurzschlussversuch	333
5.5.3	Kettenprüfung aus Sicht der Lichtbogenwirkung – Lichtbogentest	335
5.6	Ausgewählte Projekt-Beispiele	337
5.6.1	Fehl-anwendung von Lichtbogenschutzarmaturen von Kappenisolatorenketten für Verbundisolatorenketten	337
5.6.2	Koordination von Koronaring und Lichtbogenschutzarmatur	340
5.6.3	Direktbefestigung von Lichtbogenschutzarmaturen auf Armaturen von Verbundisolatoren	340
5.6.4	Einfluss des Kettendesigns am Mast	344
5.7	Zusammenfassung	346
5.8	Formelzeichen und Abkürzungen	347
	Literatur	348
6	Fremdschichtisoliervermögen von Polymerisolatoren	351
6.1	Einleitung	351
6.2	Grundlagen zum elektrischen Verhalten von Polymerisolatoren bei Fremdschichtbelastungen	354
6.2.1	Vor- und Überschlagnprozesse bei unterschiedlichen Benetzungszuständen	354
6.2.1.1	Kennzeichnung der Benetzungszustände	354
6.2.1.2	Polymerisolatoren mit stark hydrophobem Benetzungszustand (Fremdschichtbelag Typ A)	357

	6.2.1.3	Polymerisolatoren bei einem Übergang vom hydrophoben in den hydrophilen Benetzungszustand (Fremdschichtbelag Typ B)	362
	6.2.1.4	Polymerisolatoren mit hydrophilem Benetzungszustand (Fremdschichtbelag Typ C)	367
	6.2.2	Vor- und Überschlagprozesse bei Schädigungs- und Alterungszuständen	380
6.3		Experimentiertechnik, Mess- und Prüfverfahren	383
	6.3.1	Messung und Bewertung des Verschmutzungsgrades	383
	6.3.1.1	Elektrische Kenngrößen	384
	6.3.1.2	Weitere Verschmutzungskenngrößen.	389
	6.3.2	Messung und Bewertung des Fremdschichtisoliervermögens.	391
	6.3.2.1	Verschmutzungsverfahren	391
	6.3.2.2	Prüftechniken.	394
	6.3.2.3	Bewertungsmethoden	396
	6.3.2.4	Prüfungen natürlich verschmutzter Isolatoren ...	398
	6.3.3	Elektrische Prüfungen zur Ermittlung des Alterungsverhaltens	399
6.4		Einfluss des Isolator designs auf den Fremdschichtüberschlag.	401
	6.4.1	Grundlegende Aspekte zur Kriechwegdimensionierung von Freiluftisolatoren	401
	6.4.2	Silikon-Verbundisolatoren mit unterschiedlichem Schirmprofil	408
	6.4.2.1	Isolatoroberflächen im hydrophoben Benetzungszustand	408
	6.4.2.2	Isolatoroberflächen im hydrophilen Benetzungszustand	410
	6.4.3	Silikon-Verbundisolatoren mit unterschiedlichem Strunkdurchmesser.	419
	6.4.3.1	Isolatoroberflächen im hydrophoben Benetzungszustand	419
	6.4.3.2	Isolatoroberflächen im hydrophilen Benetzungszustand	420
	6.4.4	Spezielle Isolator konstruktionen und Anordnungen	422
	6.4.4.1	Konische bzw. tonnenförmige Isolatoren	422
	6.4.4.2	Isolatoren mit spiralförmigen oder abgestuften Schirmen	424
	6.4.4.3	Parallele Isolatoren	427

6.5	Einfluss des Isolator designs auf das elektrische Alterungsverhalten	429
6.5.1	Einfluss des Schirmprofils und des Mantelwerkstoffs von Polymerisolatoren	429
6.5.2	Einflüsse des Herstellungsverfahrens	435
6.5.3	Weitere Bewertungskriterien	436
6.5.3.1	Messung der Ableitströme	436
6.5.3.2	Messung der Überschlagspannung	439
6.5.3.3	Messung der Strom-Spannungs-Charakteristik und Vergleich mit Bezugskennlinien	440
6.6	Bewertungen spezieller Fremdschichtbelastungen	442
6.6.1	Ungleichmäßige Verschmutzungen entlang des Kriechweges	444
6.6.1.1	Modellisolator	444
6.6.1.2	Schirmisolatoren	447
6.6.2	Ungleichmäßige Benetzungen entlang des Kriechweges	451
6.6.3	Ungleichmäßige Benetzung am Isolatorumfang	456
6.6.4	Eis- und Schneeablagerungen auf Isolatoren	458
6.7	Vergleichende Bewertungen zum Fremdschichtisoliervermögen bei Wechsel- und Gleichspannung	464
6.8	Zusammenfassung	466
6.9	Formelzeichen	467
	Literatur	470
7	Langstabisolatoren	477
7.1	Einleitung	477
7.2	Das Verhalten von Verbundlangstabisolatoren unter mechanischer Beanspruchung	480
7.2.1	Äußere Belastungen	481
7.2.2	Dauerstandfestigkeit	482
7.2.2.1	Dauerkraftkurve nach IEC 61109 (1992)	487
7.2.2.2	Mechanisches Modell für das Langzeitverhalten von Verbundisolatoren	489
7.3	Verhalten bei dynamischer Belastung	494
7.4	Auslegung und Montage von Endarmaturen	499
7.4.1	Entwicklung und Stand der Technik der Metallarmaturen	499
7.4.2	Grundsätzliche Überlegungen zu der Auslegung von Pressarmaturen	499
7.4.3	Montagetechnik von Pressarmaturen	502
7.4.4	Berechnungssystematik	503
7.4.5	Einfache analytische Methode	503

7.4.6	Komplexe analytische Methode	504
7.4.6.1	Verpressung	505
7.4.6.2	Relaxation	509
7.4.6.3	Zugbelastung/Pull-out	509
7.4.7	Numerische Simulationenmethoden.	512
7.4.7.1	Finite Elemente Modellierung.	512
7.4.7.2	Rechenergebnisse der Simulation	513
7.4.7.3	Ergebnisse der numerischen Simulation beim Versagen	514
7.4.7.4	Versuchsergebnisse	516
7.4.7.5	Sensitivitätsanalyse	517
7.4.8	Health monitoring	519
7.5	Formelzeichen und Abkürzungen.	522
	Literatur.	523
8	Stützisolatoren.	525
8.1	Einleitung	525
8.2	Anwendungen von Verbundstützisolatoren	525
8.3	Das Verhalten von Verbundstützisolatoren unter Biegung	530
8.3.1	Allgemeines	530
8.3.2	Einführung einer Schadensgrenze (damage limit)	531
8.3.2.1	Versuche zur Bestimmung der Schadensgrenze	533
8.3.2.2	Versuch zur Bestimmung der maximalen Betriebsbiegelast (MDCL)	536
8.3.2.3	Bestimmung der MDCL und der CFL im gleichen Versuch	538
8.4	Herstellerangaben zum SCL/MDCL Konzept	539
8.5	Das sichere Verhalten beim Versagen von Verbundstützisolatoren (safe failure mode)	539
8.6	Kombinierte Belastungen.	543
8.6.1	Lastdiagramme.	544
8.6.2	Beispiele.	545
8.6.2.1	Horizontale Lage des Isolators	545
8.6.2.2	Isolator bildet einen Winkel von $\beta = 15^\circ$ zur Horizontalen	546
8.6.3	Computersimulation.	546
8.6.4	Versuche	547
8.7	Dynamische Belastungen.	548
8.7.1	Prüflinge	548
8.7.2	Prüfverfahren	548
8.7.3	Versuchsergebnisse.	549

8.8	Konstruktive Auslegung der Endarmaturen	550
8.9	Analytische Berechnungsmethode	552
8.9.1	Einfache analytische Methode	553
8.9.2	Komplexe analytische Methode	554
8.9.2.1	Radiale Druckspannung an der Öffnung der Fußarmatur	555
8.9.2.2	Normalspannung im GFK-Stab innerhalb der Fußarmatur	555
8.9.2.3	Schubspannung in der neutralen Achse des Stabes	556
8.10	Numerische Simulation	557
8.10.1	Finite Elemente Modell	558
8.10.2	Versuchsanordnung	559
8.11	Das Versagensverhalten von Verbundstützisolatoren	561
8.12	Sensitivitätsanalyse	566
8.13	Verbundstützisolatoren in Freiluftschaltanlagen	567
8.14	Formelzeichen und Abkürzungen	567
	Literatur	569
9	Kompaktleitungen	571
9.1	Einleitung	571
9.2	Grundsätze der Kompaktierung	572
9.2.1	Einfluss der Seilaufhängung auf das Mastbild	572
9.2.2	Möglichkeiten der Leitungskompaktierung	573
9.2.2.1	V-Ketten	573
9.2.2.2	Leitungsstützisolator	573
9.2.2.3	Abgehängter Leitungsstützisolator	575
9.2.2.4	Isoliertraverse	575
9.3	Die mechanische Auslegung von Isoliertraversen	576
9.3.1	Die fest eingespannte Isoliertraverse	578
9.3.2	Die gelenkig gelagerte Isoliertraverse (horizontal-V)	580
9.3.3	Dynamische Belastungen	586
9.3.4	Stabilitätsuntersuchungen	588
9.4	Dimensionierung von V-Ketten	599
9.5	Anwendungen von Verbundisolatoren in Kompaktleitungen	602
9.5.1	400-kV-Leitung mit Hohlkörperisolatoren	602
9.5.2	Notgestänge mit Verbundisolatoren	602
9.5.3	400-kV-Doppelleitung mit Vollkernverbundtraversen	605
9.5.4	Ersatz einer 150-kV- durch eine 380-kV-Doppelleitung	606
9.5.5	Adler-Leitung	608
9.5.6	Diamond-Leitung	610
9.5.7	Wintrack-Leitung	612
9.5.8	Projekt Avelin – Gavrelle	613

9.5.9	Der Germoglio-Mast	614
9.5.10	Isoliertraversen zur Aufwertung (<i>uprating</i>) einer 245-kV-Leitung auf 420 kV.....	617
9.5.11	CompactLine	618
9.5.12	420-kV-Compact Plus mit integriertem Überspannungsableiter.....	618
9.5.13	500-kV-Kompaktleitung in Indonesien	619
9.5.14	Kompakt-Mehrfachgestänge mit Verbundisolatoren in der Zentralschweiz	621
9.5.15	Leiterseilfixierung	621
9.6	Formelzeichen und Abkürzungen.....	623
	Literatur.....	624
10	Phasenabstandshalter mit Verbundisolatoren	627
10.1	Einleitung.....	627
10.2	CIGRE-Umfrage	628
10.2.1	Auswertung Fragebogen.....	628
10.2.2	Betriebserfahrungen.....	631
10.3	Anschlusstechnik	632
10.4	Mechanische Auslegung von Phasenabstandshaltern.....	635
10.4.1	Seiltanzen (Galloping)	635
10.4.1.1	Galloping-Amplituden	635
10.4.1.2	Bauweisen	636
10.4.1.3	Einbauempfehlungen.....	637
10.4.1.4	Belastung der PAH durch Seiltanzen	640
10.4.1.5	Feldversuche	642
10.4.2	Abwurf von Eislasten und Stoßkräfte auf die PAH	644
10.4.3	Elektrodynamische Kurzschlusskräfte	646
10.4.4	Das Knickverhalten von Phasenabstandshaltern	651
10.5	Elektrische Auslegung von Phasenabstandshaltern	656
10.5.1	Mindestlänge	656
10.5.2	Schutzarmaturen.....	656
10.5.3	Kriechweg	657
10.6	Anwendungen.....	658
10.6.1	Kompaktleitung für Mittelspannung	658
10.6.2	Phasenabstandshalter gegen Seiltanzen durch Eisabwurf	659
10.6.3	Der Tennisschlägermast	662
10.7	Formelzeichen und Abkürzungen.....	664
	Literatur.....	666

11	Hohlisolatoren	669
11.1	Einleitung	669
11.2	Verbundisolatoren in Freiluftschaltanlagen	669
11.2.1	Durchführungen	670
11.2.2	Überspannungsableiter	670
11.2.3	Freiluftendverschlüsse für Kunststoffkabel	672
11.2.4	Strom- und Spannungswandler	673
11.2.5	Freiluftleistungsschalter	675
11.2.6	Freiluftlasttrennschalter	675
11.3	GFK-Rohr	676
11.4	Endarmaturen	676
11.5	Das mechanische Verhalten von Verbundhohlisolatoren bei der Biegung	677
11.5.1	Versagensmechanismen und diagnostische Methoden von Verbundhohlisolatoren	677
11.5.2	Das Konzept der „Schadensgrenze“ bei Verbundhohlisolatoren	678
11.6	Prüfung von Verbundhohlisolatoren	679
11.6.1	Definitionen der Lasten	679
11.6.2	Biegebelasten	681
11.6.3	Drucklasten	681
11.6.4	Beispiele aus der Versuchspraxis nach IEC 61462	682
11.6.4.1	Hohlkörperisolator für einen 145-kV-Überspannungsableiter	682
11.6.4.2	Hohlkörperisolator für eine 500-kV-Durchführung	686
11.6.4.3	Hohlkörperisolator für eine 800-kV-DC-Durchführung	687
11.7	Dimensionierung	690
11.7.1	Einfache analytische Methode	690
11.7.1.1	Dimensionierung des GFK-Rohres	691
11.7.1.2	Bestimmung der Kleblänge zwischen Rohr und Armatur	691
11.7.1.3	Auslegung der Verbindungselemente zum Unterbau	693
11.7.2	Numerische Simulationsmethoden	694
11.7.2.1	Finite Elemente Modellierung der Verbund/Metallverbindung	694
11.7.2.2	Numerische Simulation des inneren Spannungszustandes	695
11.7.2.3	Experimentelle Überprüfung der Simulation	696

11.8	Formelzeichen und Abkürzungen.	699
	Literatur.	700
12	Zur Laborbewertung von Verbundisolatoren nach deren	
	Entnahme aus dem Netz.	701
12.1	Einleitung.	701
12.1.1	Ist die Bewertung von Verbundisolatoren notwendig?.....	702
12.1.2	Interfacebereiche als wesentliches Kennzeichen von Verbundisolatoren.	703
12.2	Ursachen für die Bewertung von Verbundisolatoren nach der Entnahme aus dem Netz.	703
12.2.1	Bewertung eines eingebauten Isolatorenbestandes hinsichtlich des Alterungszustandes.	704
12.2.2	Bewertung eines Isolatorausfalls oder eines Isolatortyps mit hohem Ausfallrisiko.	705
12.2.3	Bewertung von Verbundisolatoren für Forschungszwecke.	706
12.3	Ausfallrate/Ausfälle von Verbundisolatoren.	707
12.3.1	USA/EPRI.	707
12.3.2	CIGRE Umfrage, publiziert im Jahr 2000.	708
12.3.3	Betriebserfahrungen in China.	710
12.4	Allgemein angewandte Prüfstrategien.	714
12.4.1	Identifikation der Prüflinge.	714
12.4.2	Reihenfolge der Prüfungen.	714
12.4.3	Visuelle Bewertung.	715
12.4.4	Mechanische Bewertung.	722
12.4.5	Elektrische Bewertung.	724
12.4.6	Materialanalyse.	726
	12.4.6.1 Mantelwerkstoffe.	727
	12.4.6.2 Stabmaterial.	728
	12.4.6.3 Armaturen.	728
12.4.7	Mantelwerkstoff-Finger-Print.	728
12.4.8	Oberflächenanalyse.	729
	12.4.8.1 Fremdschichtanlagerung.	730
	12.4.8.2 Oberflächenveränderungen.	730
	12.4.8.3 Hydrophobieklasse.	730
	12.4.8.4 Wirksamkeit des Hydrophobie-Transfer.	730
	12.4.8.5 Hydrophobie-Transfer.	731
12.5	Zusammenfassung zur Auswahl von Prüfverfahren und Ausfallkriterien.	731
12.6	Beispiele für Prüfprogramme und deren Ergebnisse.	732

12.6.1	Beispiel 1: 420-kV-Verbundisolator mit gestepptem Spritzgussisolierrmantel nach 10-jährigem Einsatz.	732
12.6.1.1	Prüflinge und Teststrategie	732
12.6.1.2	Ergebnisse – Hydrophobie	734
12.6.1.3	Ergebnisse – Prüfung der SML und Grenzl原因 ...	736
12.6.1.4	Ergebnisse – Interface- und Mantelwerkstoffprüfungen	736
12.6.1.5	Ergebniszusammenfassung	742
12.6.2	Beispiel 2: 420-kV-Verbundisolator mit im Modularverfahren hergestellten Isolierrmantel nach 10-jährigem Einsatz.	742
12.6.2.1	Prüflinge	742
12.6.2.2	Visuelle Bewertung	743
12.6.2.3	Prüfprogramm	743
12.6.2.4	Ergebnisse – Hydrophobie-Bewertung	744
12.6.2.5	Ergebnisse – Bewertung der Dichtung	745
12.6.2.6	Ergebnisse – Haftungsprüfung	746
12.6.2.7	Ergebnisse – 96-h-Zugbelastung mit 75 % SML und Grenzl原因prüfung.	748
12.6.2.8	Ergebnisse – Verzinkungsprüfung.	748
12.6.2.9	Ergebnisse – Dye-Penetrationsprüfung (IEC 61109).	748
12.6.2.10	Ergebnisse – Grenzl原因prüfung ohne Vorbelastung (IEC 61109).	749
12.6.2.11	Zusammenfassendes Ergebnis.	749
12.6.3	Beispiel 3: 15-kV-Verbundisolator nach 15-jährigem Einsatz im Tunnelbahnbetrieb	749
12.6.3.1	Prüflinge und Prüfprogramm.	749
12.6.3.2	Ergebnisse – Fremdschichtmessungen	750
12.6.3.3	Ergebnisse – Modifizierte Klarnebelprüfung ...	751
12.6.3.4	Ergebnisse – Grenzbiegekr原因prüfung.	752
12.6.3.5	Zusammenfassung.	754
12.6.4	Beispiel 4: Analyse von Verzinkungsdicken und Hydrophobiewirkung nach 30-jährigem 15-kV- Tunnelbahnbetrieb	754
12.6.4.1	Vorgehensweise.	755
12.6.4.2	Visuelle Beobachtungen	755
12.6.4.3	Ergebnisse – Zinkschichtdicke	757
12.6.4.4	Ergebnisse – Fremdschichtanalyse	758
12.6.4.5	Zusammenfassung.	759

12.6.5	Beispiel 5: Bewertung von 123-kV-Isolatoren zur Produktqualifikation	759
12.6.5.1	Prüflinge und Prüfprogramm.	759
12.6.5.2	Inspektion der Verbundisolatoren am Versuchsmast.	760
12.6.5.3	Quick-Salznebelprüfung	761
12.6.5.4	Bewertung des Interface-Isoliervermögens.	761
12.6.5.5	Ergebnisse – Inspektion am Versuchsmast	761
12.6.5.6	Ergebnisse – Quick-Salznebelprüfung	761
12.6.5.7	Ergebnisse – Interface-Isoliervermögen	762
12.6.5.8	Schlussfolgerung.	762
12.6.6	Untersuchung eines 525-kV-Tragisolators nach Ausfall	762
12.6.7	Untersuchungen von Verbundisolatoren mit biogenem Bewuchs bzw. Oberflächenveränderung durch Verkieselung und Säureangriff	767
12.6.8	Beispiel für die Ableitung von Zuverlässigkeitszahlen	768
12.6.8.1	Erfahrungswerte mit Verbundisolatoren	768
12.6.8.2	Betriebserfahrung mit Porzellanisolatoren	768
12.6.8.3	Getroffene Annahmen	769
12.6.8.4	Statistisch-mathematische Berechnung.	769
12.7	Zusammenfassung	770
12.8	Formelzeichen und Abkürzungen.	771
	Literatur.	772
13	Eine Übersicht zur Normung und zur Prüfung von Verbundisolatoren	777
13.1	Einleitung	777
13.2	Stand der IEC-Normung von Verbundisolatoren und Gemeinsamkeiten im Vergleich zu konventionellen Isolatoren und Isolatorenketten	780
13.3	Überprüfung des Schirmhüllenwerkstoffs auf Entzündungs- und Selbstlöschungseigenschaften	784
13.4	Prüfverfahren zur Bewertung betriebsrelevanter Eigenschaften	784
13.5	Schiefe-Ebene-Prüfung für AC zur Bewertung der Beständigkeit gegen Erosion und Kriechspurbildung	788
13.5.1	Einfluss der Prüfkörperhalterung	788
13.5.2	Einfluss der Elektrodenrauheit.	790
13.5.3	Einfluss der Spannungsquelle (s. a. Abschn. 6.3.2)	790
13.5.4	Einfluss des Stichprobenumfanges.	795
13.5.5	Prüfung von Silikongummi-Coatings.	795
13.5.6	Prüfung im Rahmen intensivierter Abnahmeprüfungen.	797
13.6	Prinzip der Schiefe-Ebene-Prüfung zur Bewertung der elektrischen Wirksamkeit der Hydrophobie.	799
13.6.1	Hydrophobiebeständigkeit	799

13.6.2	Prinzip der Schiefe-Ebene-Prüfung zur Bewertung des Hydrophobie-Transfers	801
13.7	Finger-Print-Analyse von polymeren Mantelwerkstoffen	807
13.7.1	Hintergrund	807
13.7.2	Übersicht der Verfahren	808
13.7.3	Details zu den Verfahren und Beispiele	809
13.7.3.1	Dichte- und Härtemessung	809
13.7.3.2	Dynamische Differenzkalorimetrie	809
13.7.3.3	Thermogravimetrische Analyse	809
13.7.3.4	Thermomechanische Analyse (TMA)	812
13.7.3.5	Dynamisch-mechanische Analyse (DMA)	812
13.7.3.6	Fourier-Transform-Infrarot-Spektroskopie	812
13.7.3.7	Mechanische Materialprüfung	814
13.8	Verfahren zur Bestimmung der Prozesseigenschaften	815
13.9	Zusammenfassung	817
13.10	Formelzeichen und Abkürzungen	817
	Literatur	818
14	Trends	827
14.1	Einleitung	827
14.2	Zur Bedeutung und Bewertung des Stab-Isoliermantel-Interfaces von Verbundisolatoren	828
14.2.1	Stand der Normung bezüglich Interface-Bewertung	829
14.2.2	Analyse von Bauartprüfungen im Labor [14, 17, 19]	830
14.2.3	Betriebserfahrungen	831
14.2.3.1	China [3, 5, 8, 10, 11]	831
14.2.3.2	Schweden [7, 16]	833
14.2.3.3	Südafrika [16]	834
14.2.3.4	Fernost (Far East) [4]	836
14.2.3.5	Osteuropa [14, 17, 19]	836
14.2.4	Bewertung der Betriebserfahrungen und Ursachenanalyse für den Interface-Ausfall	838
14.2.4.1	Bewertung der Betriebserfahrungen	838
14.2.4.2	Ursachenanalyse für den Interface-Ausfall	839
14.2.4.3	Stabeinfluss beim Verlust der elektrischen Funktion	840
14.2.4.4	Stabeinfluss beim Verlust der mechanischen Funktion	840
14.2.5	Verbesserung der Interfacebewertung durch zusätzliche Prüfungen	841
14.2.5.1	Bewertung existierender bzw. alternativer Prüfverfahren	842

14.2.5.2	Ableitung eines neuen kombinierten Prüfverfahrens	845
14.2.5.3	Bewertung des neuen kombinierten Prüfverfahrens in einem internationalen Rundversuch (Round-Robin-Test).	846
14.2.6	Bewertung des Interfaces mit erweiterter Wasserlagerung [14, 17, 19]	849
14.3	Prüfung und Auslegung von Verbundisolatoren bei Betriebseinsatz mit Gleichspannung	850
14.3.1	Prüfung ausgewählter Materialeigenschaften.	850
14.3.1.1	Beständigkeit gegenüber Erosion und Kriechspurbildung in der Schiefe-Ebene-Prüfung	850
14.3.1.2	Dynamische Hydrophobieeigenschaften.	858
14.3.2	DC-Kriechwegdimensionierung von Isolatoren.	863
14.3.2.1	Bekannte Unterschiede zwischen AC- und DC-Anwendungen.	863
14.3.2.2	Stand der Normung	866
14.3.2.3	Betriebserfahrungen	872
14.3.3	Ausgewählte Aspekte zur elektrischen DC-Feldberechnung von Isolatorketten	877
14.3.4	Korrosion	882
14.3.5	AC-DC-Hybridleitungen	887
14.3.5.1	Generelle und technische Betrachtungen	887
14.3.5.2	Verbundisolatoren für AC-DC-Hybridleitungen	891
14.4	Weitere Aspekte	896
14.4.1	Coating	896
14.4.2	Superhydrophobie	901
14.4.3	Verbesserung des Verhaltens gegenüber Trockenbandentladungen	906
14.4.4	Arbeiten unter Spannung mit Verbundisolatoren	908
14.5	Recycling von Verbundisolatoren.	911
14.6	Outlook für die Freileitungstechnik	916
14.7	Zusammenfassung	919
14.8	Formelzeichen und Abkürzungen.	920
	Literatur.	922

Stichwortverzeichnis.	933
-------------------------------	-----