

**Isolationskoordination –
Teil 2: Anwendungsrichtlinie**

Inhalt		Seite
1	Allgemeines.....	9
1.1	Anwendungsbereich.....	9
1.2	Normative Verweisungen.....	9
1.3	Liste von Formelzeichen und Definitionen.....	10
2	Repräsentative Spannungsbeanspruchungen im Betrieb.....	15
2.1	Ursache und Klassifizierung von Spannungsbeanspruchungen.....	15
2.2	Kennwerte von Überspannungsschutzgeräten.....	15
2.2.1	Allgemeine Bemerkungen.....	15
2.2.2	Metalloxid-Überspannungsableiter ohne Funkenstrecke (MOSA).....	16
2.2.3	Leitungsableiter (LSA) für Übertragungs- und Verteilungsfreileitungen.....	18
2.3	Repräsentative Spannungen und Überspannungen.....	18
2.3.1	Betriebsfrequente Spannung (Dauerspannung).....	18
2.3.2	Zeitweilige Überspannungen.....	18
2.3.3	Langsam ansteigende Überspannungen.....	22
2.3.4	Schnell ansteigende Überspannungen.....	28
2.3.5	Sehr schnell ansteigende Überspannungen [12, 13].....	32
3	Koordinationsstehspannung.....	33
3.1	Kennwerte der Isolationsfestigkeit.....	33
3.1.1	Einfluss von Polarität und Überspannungsformen.....	34
3.1.2	Leiter-Leiter-Isolierung und Längsisolierung.....	35
3.1.3	Einfluss von Wetterbedingungen auf die äußere Isolierung.....	35
3.1.4	Durchschlagwahrscheinlichkeit der Isolierung.....	36
3.2	Auswahlkriterium.....	37
3.3	Verfahren der Isolationskoordination.....	38
3.3.1	Verfahren der Isolationskoordination für (betriebsfrequente) Dauerspannung und zeitweilige Überspannung.....	39
3.3.2	Verfahren der Isolationskoordination für langsam ansteigende Überspannungen.....	39
3.3.3	Verfahren der Isolationskoordination für schnell ansteigende Überspannungen.....	44
4	Erforderliche Stehspannung.....	44
4.1	Allgemeine Bemerkungen.....	44
4.2	Atmosphäre Korrektur.....	44
4.2.1	Allgemeine Bemerkungen.....	44
4.2.2	Höhenkorrektur.....	45
4.3	Sicherheitsfaktoren.....	46
4.3.1	Alterung.....	47

	Seite
4.3.2	Fertigungs- und errichtungsbedingte Streuung..... 47
4.3.3	Ungenauigkeit der Stehspannung..... 47
4.3.4	Empfohlene Sicherheitsfaktoren K_s 47
5	Genormte Stehspannung und Prüfverfahren 48
5.1	Allgemeine Bemerkungen 48
5.1.1	Genormte Steh-Schaltstoßspannung..... 48
5.1.2	Genormte Steh-Blitzstoßspannung 48
5.2	Prüf-Umrechnungsfaktoren 49
5.2.1	Bereich I 49
5.2.2	Bereich II 49
5.3	Bestimmung des Stehvermögens der Isolierung durch Typprüfungen 50
5.3.1	Prüfverfahren in Abhängigkeit von der Art der Isolierung 50
5.3.2	Nichtselbsteilende Isolierung..... 50
5.3.3	Selbsteilende Isolierung 51
5.3.4	Gemischte Isolierung..... 51
5.3.5	Grenzen der Prüfverfahren..... 52
5.3.6	Auswahl von Typprüfverfahren..... 52
5.3.7	Auswahl der Prüfspannungen für Typprüfungen..... 53
6	Spezielle Betrachtungen für Freileitungen 53
6.1	Allgemeine Bemerkungen 53
6.2	Isolationskoordination für Betriebsspannungen und zeitweilige Überspannungen..... 54
6.3	Isolationskoordination für langsam ansteigende Überspannungen 54
6.3.1	Erdfehler-Überspannungen 54
6.3.2	Einschalt- und Wiedereinschalt-Überspannungen 54
6.4	Isolationskoordination für Blitzüberspannungen 55
6.4.1	Verteilungsleitungen 55
6.4.2	Übertragungsleitungen 55
7	Besondere Überlegungen zu Stationen 56
7.1	Allgemeine Bemerkungen 56
7.1.1	Betriebsspannung 56
7.1.2	Zeitweilige Überspannung 56
7.1.3	Langsam ansteigende Überspannungen 56
7.1.4	Schnell ansteigende Überspannungen 57
7.2	Isolationskoordination für Überspannungen..... 57
7.2.1	Stationen in Verteilungsnetzen mit U_m bis 36 kV im Bereich I..... 57
7.2.2	Stationen in Übertragungsnetzen mit U_m zwischen 52,5 kV und 245 kV im Bereich I 58
7.2.3	Stationen in Übertragungsnetzen im Bereich II..... 58
Anhang A (informativ) Bestimmung zeitweiliger Überspannungen infolge von Erdfehlern 59	

	Seite
Anhang B (informativ) Weibull-Wahrscheinlichkeitsverteilungen	63
B.1 Allgemeine Bemerkungen	63
B.2 Durchschlagwahrscheinlichkeit der äußeren Isolierung.....	64
B.3 Kumulierte Häufigkeitsverteilung von Überspannungen	66
Anhang C (informativ) Bestimmung der repräsentativen langsam ansteigenden Überspannung infolge des Einschaltens und Wiedereinschaltens von Leitungen	68
C.1 Allgemeine Bemerkungen	68
C.2 Wahrscheinlichkeitsverteilung der repräsentativen Amplitude der unbeeinflussten Leiter- Erde-Überspannung	68
C.3 Wahrscheinlichkeitsverteilung der repräsentativen Amplitude der unbeeinflussten Leiter- Leiter-Überspannung	68
C.4 Isolationskennlinie	70
C.5 Zahlenbeispiel	72
Anhang D (informativ) Übertragene Überspannungen in Transformatoren	76
D.1 Allgemeine Bemerkungen	76
D.2 Übertragene zeitweilige Überspannungen	77
D.3 Kapazitiv übertragene Überspannungsschläge	78
D.4 Induktiv übertragene Überspannungsschläge	79
Anhang E (informativ) Blitzüberspannungen	83
E.1 Allgemeine Bemerkungen	83
E.2 Bestimmung der Grenzentfernung (X_p).....	83
E.2.1 Schutz durch Überspannungsableiter in der Station.....	83
E.2.2 Selbstschutz von Stationen	84
E.3 Schätzwert für die repräsentativen Blitzüberspannungsamplitude	85
E.3.1 Schirmdurchdringung	85
E.3.2 Rückwärtige Überschläge	86
E.4 Vereinfachtes Verfahren	88
E.5 Angenommener Höchstwert der repräsentativen Blitzüberspannung	89
Anhang F (informativ) Berechnung der Durchschlagfestigkeit von Luftstrecken aus Versuchsergebnissen.....	91
F.1 Isolationsverhalten bei betriebsfrequenten Spannungen.....	91
F.2 Isolationsverhalten bei langsam ansteigenden Überspannungen	92
F.3 Isolationsverhalten bei schnell ansteigenden Überspannungen.....	93
Anhang G (informativ) Beispiele für das Verfahren der Isolationskoordination	97
G.1 Zahlenbeispiel für ein Netz im Bereich I (mit einer Nennspannung von 230 kV)	97
G.1.1 Teil 1: Keine speziellen Betriebsbedingungen	98
G.1.1.1 Schritt 1: Bestimmung der repräsentativen Überspannungen – Werte für U_{rp}	98
G.1.1.2 Schritt 2: Bestimmung der Koordinationsstehspannungen – Werte für U_{cw}	100
G.1.1.3 Schritt 3: Bestimmung der erforderlichen Stehspannungen – Werte für U_{rw}	101

	Seite
G.1.1.4 Schritt 4: Umrechnung in für den Bereich I normierte Stehspannungen.....	103
G.1.1.5 Schritt 5: Auswahl der genormten Stehspannungswerte	104
G.1.2 Teil 2: Einfluss des Schaltens von Kondensatoren in Station 2	105
G.1.3 Teil 3: Flussdiagramme für Beispiel G.1	107
G.2 Zahlenbeispiel für ein Netz im Bereich II (mit einer Nennspannung von 735 kV).....	112
G.2.1 Schritt 1: Bestimmung der repräsentativen Überspannungen – Werte für U_{rp}	112
G.2.1.1 Betriebsfrequente und zeitweilige Überspannung.....	112
G.2.1.2 Langsam ansteigende Überspannung	112
G.2.1.3 Schnell ansteigende Überspannung	112
G.2.2 Schritt 2: Bestimmung der Koordinationsstehspannungen – Werte für U_{cw}	113
G.2.2.1 U_{cw} für die innere Isolierung.....	113
G.2.2.2 U_{cw} für die äußere Isolierung	114
G.2.3 Schritt 3: Bestimmung der erforderlichen Stehspannungen – Werte für U_{rw}	114
G.2.3.1 U_{rw} für die innere Isolierung	115
G.2.3.2 U_{rw} für die äußere Isolierung.....	115
G.2.4 Schritt 4: Umrechnung in die Steh-Schaltstoßspannung (SIWV).....	115
G.2.5 Schritt 5: Auswahl der genormten Isolationspegel	116
G.2.5.1 U_w für die innere Isolierung	116
G.2.5.2 U_w für die äußere Isolierung.....	116
G.2.6 Überlegungen zur Leiter-Leiter-Isolationskoordination	116
G.2.7 Leiter-Erde-Abstände	117
G.2.8 Leiter-Leiter-Abstände	118
G.3 Zahlenbeispiel für Stationen in Verteilungsnetzen mit U_m bis 36 kV im Bereich I	118
G.3.1 Schritt 1: Bestimmung der repräsentativen Überspannungen – Werte für U_{rp}	119
G.3.1.1 Betriebsfrequente und zeitweilige Überspannung.....	119
G.3.1.2 Langsam ansteigende Überspannungen	119
G.3.1.3 Schnell ansteigende Überspannungen	119
G.3.2 Schritt 2: Bestimmung der Koordinationsstehspannungen – Werte für U_{cw}	119
G.3.2.1 Zeitweilige Überspannungen.....	119
G.3.2.2 Langsam ansteigende Überspannungen	120
G.3.2.3 Schnell ansteigende Überspannungen	120
G.3.3 Schritt 3: Bestimmung der erforderlichen Stehspannungen – Werte für U_{rw}	120
G.3.3.1 Sicherheitsfaktoren.....	120
G.3.3.2 Höhenkorrekturfaktor.....	120
G.3.3.3 Zeitweilige Überspannung	121
G.3.3.4 Langsam ansteigende Überspannung	121

	Seite
G.3.3.5 Schnell ansteigende Überspannung	121
G.3.4 Schritt 4: Umrechnung in genormte Kurzzeit-Stehwechselspannungen und genormte Steh- Blitzstoßspannungen	121
G.3.4.1 Umrechnung in die Kurzzeit-Stehwechselspannung (SDWV)	121
G.3.4.2 Umrechnung in die Steh-Blitzstoßspannung (LIWV)	121
G.3.5 Schritt 5: Auswahl der genormten Stehspannungen	122
G.3.6 Zusammenfassung des Isolationskoordinationsverfahrens für Beispiel G.3	122
Anhang H (informativ) Atmosphärische Korrektur – Höhenkorrektur	124
H.1 Allgemeine Grundsätze	124
H.1.1 Atmosphärische Korrektur bei genormten Prüfungen	124
H.1.2 Aufgabe der atmosphärischen Korrektur bei der Isolationskoordination	125
H.2 Atmosphärische Korrektur bei der Isolationskoordination	126
H.2.1 Faktoren für die atmosphärische Korrektur	126
H.2.2 Allgemeine Kennwerte für gemäßigtes Klima	127
H.2.3 Besondere atmosphärische Bedingungen	128
H.2.4 Höhenabhängigkeit des Luftdruckes	128
H.3 Höhenkorrektur	129
H.3.1 Definition des Höhenkorrekturfaktors	129
H.3.2 Prinzip der Höhenkorrektur	130
H.3.3 Genormte Betriebsmittel, die in Höhen bis 1 000 m betrieben werden	130
H.3.4 Betriebsmittel, die in Höhen über 1 000 m betrieben werden	131
H.4 Auswahl des Exponenten m	131
H.4.1 Ableitung des Exponenten m für Schaltstoßspannungen	132
H.4.2 Ableitung des Exponenten m für die kritische Schaltstoßspannung	135
Anhang I (informativ) Bewertungsmethode für die Blitzüberspannungsform	137
I.1 Allgemeine Bemerkungen	137
I.2 Blitzüberspannungsform	137
I.3 Bewertungsmethode für GIS	137
I.3.1 Versuche	137
I.3.2 Bewertung der Überspannungsform	138
I.4 Bewertungsmethode für Transformatoren	138
I.4.1 Versuche	138
I.4.2 Bewertung der Form	138
Anhang J (informativ) Isolationskoordination für sehr schnell ansteigende Überspannungen in UHV-Stationen	144
J.1 Allgemeines	144
J.2 Einfluss der Trennschalterausführung	144
J.3 Isolationskoordination für VFFO	145
Literaturhinweise	147

	Seite
Bilder	
Bild 1 – Bereiche der 2 %-Werte langsam ansteigender Überspannungen am Leitungsende beim Einschalten und Wiedereinschalten der Leitung	24
Bild 2 – Verhältnis zwischen den 2 %-Werten von langsam ansteigenden Leiter-Leiter- und Leiter-Erde-Überspannungen	25
Bild 3 – Schaltplan für den Anschluss des Überspannungsableiters an das geschützte Objekt	32
Bild 4 – Durchschlagwahrscheinlichkeit einer selbstheilenden Isolierung bei linear geteilter Ordinate	40
Bild 5 – Durchschlagwahrscheinlichkeit einer selbstheilenden Isolierung bei Gauß-geteilter Ordinate.....	40
Bild 6 – Bestimmung des deterministischen Koordinationsfaktors K_{cd}	41
Bild 7 – Bewertung des Fehlerrisikos	42
Bild 8 – Fehlerrisiko einer äußeren Isolierung für langsam ansteigende Überspannungen in Abhängigkeit vom statistischen Koordinationsfaktor K_{cs}	43
Bild 9 – Abhängigkeit des Exponenten m von der Koordinations-Steh-Schaltstoßspannung	46
Bild 10 – Wahrscheinlichkeit P für das Bestehen der Prüfung eines Betriebsmittels in Abhängigkeit von der Differenz K zwischen der tatsächlichen und der Bemessungs-Steh-Stoßspannung.....	52
Bild 11 – Beispiel für eine schematische Anordnung einer Station für die örtliche Zuordnung von Überspannungsbeanspruchungen (siehe 7.1)	56
Bild A.1 – Erdfehlerfaktor k für $R_1/X_1 = R = 0$ in Abhängigkeit von X_0/X_1	60
Bild A.2 – Beziehung zwischen R_0/X_1 und X_0/X_1 für konstante Werte des Erdfehlerfaktors k mit $R_1 = 0$	60
Bild A.3 – Beziehung zwischen R_0/X_1 und X_0/X_1 für konstante Werte des Erdfehlerfaktors k mit $R_1 = 0,5 X_1$	61
Bild A.4 – Beziehung zwischen R_0/X_1 und X_0/X_1 für konstante Werte des Erdfehlerfaktors k mit $R_1 = X_1$	61
Bild A.5 – Beziehung zwischen R_0/X_1 und X_0/X_1 für konstante Werte des Erdfehlerfaktors k mit $R_1 = 2 X_1$	62
Bild B.1 – Umrechnungsdiagramm für die Herabsetzung der Stehspannung durch parallele Anordnung der Isolierungen	67
Bild C.1 – Beispiel für zweidimensionale Kurven von Leiter-Leiter-Überspannungen mit konstanter Wahrscheinlichkeitsdichte und Tangenten, die die entsprechenden 2 %-Werte angeben.....	73
Bild C.2 – Grundsätze der Bestimmung der repräsentativen Leiter-Leiter-Überspannung U_{pre}	74
Bild C.3 – Schematische Darstellung einer Leiter-Leiter-Erde-Isolieranordnung	74
Bild C.4 – Darstellung der 50 %-Überschlag-Schaltstoßspannung einer Leiter-Leiter-Erde-Isolierung.....	75
Bild C.5 – Steigungswinkel der Leiter-Leiter-Isolationskennlinie im Bereich b in Abhängigkeit vom Verhältnis der Leiter-Leiter-Luftstrecke D zur Höhe H_t über dem Erdboden	75
Bild D.1 – Verteilte Wicklungskapazitäten eines Transformators und die Ersatzschaltung für die Wicklungen	81
Bild D.2 – Werte des Faktors J , der den Einfluss der Schaltgruppe auf induktiv übertragene Überspannungsschläge beschreibt	82
Bild H.1 – Grundsätze der atmosphärischen Korrektur bei der Prüfung eines festgelegten Isolationspegels nach dem Verfahren in IEC 60060-1	125

	Seite
Bild H.2 – Hauptaufgabe der atmosphärischen Korrektur bei der Isolationskoordination nach IEC 60071-1; links: bei einem Mittelwert der atmosphärischen Bedingungen mit einem höheren Risiko; rechts: bei den ungünstigsten atmosphärischen Bedingungen mit einem geringeren Risiko	126
Bild H.3 – Vergleich der atmosphärischen Korrektur $\delta \cdot k$ mit dem relativen Luftdruck p/p_0 für verschiedene Wetterstationen auf der ganzen Welt	128
Bild H.4 – Abweichung der vereinfachten Druckberechnung mit der Exponentialfunktion nach der vorliegenden Norm (IEC 60071-2) von der temperaturabhängigen Druckberechnung nach ISO 2533	129
Bild H.5 – Prinzip der Höhenkorrektur: sinkende Stehspannung U_{10} von Betriebsmitteln mit zunehmender Höhe	130
Bild H.6 – Satz von m -Kurven für die genormte Schaltstoßspannung einschließlich der Änderungen der Höhe für jeden Funkenstreckenfaktor	134
Bild H.7 – Exponent m für die genormte Schaltstoßspannung für ausgewählte Funkenstreckenfaktoren für Höhen bis 4 000 m	134
Bild H.8 – Satz von m -Kurven für die kritische Schaltstoßspannung einschließlich der Änderungen der Höhe für jeden Funkenstreckenfaktor	135
Bild H.9 – Exponent m für die kritische Schaltstoßspannung für ausgewählte Funkenstreckenfaktoren für Höhen bis 4 000 m	135
Bild H.10 – Übereinstimmung der m -Kurven aus Bild 9 mit der Bestimmung des Exponenten m anhand der kritischen Schaltstoßspannung für ausgewählte Funkenstreckenfaktoren und Höhen	136
Bild I.1 – Beispiele für Blitzüberspannungsformen	139
Bild I.2 – Beispiel für Isolationskennwerte für Blitzüberspannungen der SF ₆ -Gasfunkenstrecke (Form E)	139
Bild I.3 – Berechnung der Dauer T_d	140
Bild I.4 – Ablauf der Bewertung der Form für GIS und Transformatoren	141
Bild I.5 – Anwendung auf GIS-Blitzüberspannungen	142
Bild I.6 – Beispiel für Isolationskennwerte für die Blitzüberspannung der Windungsisolierung (Form C)	142
Bild I.7 – Anwendung auf Blitzüberspannungen im Transformator	142
Bild J.1 – Isolationskoordination für sehr schnell ansteigende Überspannungen	146
Tabellen	
Tabelle 1 – Prüf-Umrechnungsfaktoren für den Bereich I zur Umrechnung der erforderlichen Steh-Schaltstoßspannungen in Kurzzeit-Stehwechselspannungen und Steh-Blitzstoßspannungen	49
Tabelle 2 – Prüf-Umrechnungsfaktoren für den Bereich II zur Umrechnung der erforderlichen Kurzzeit-Stehwechselspannungen in Steh-Schaltstoßspannungen	50
Tabelle 3 – Selektivität der Prüfverfahren B und C nach IEC 60060-1	51
Tabelle B.1 – Durchschlagspannung in Abhängigkeit von der Durch-/Überschlagwahrscheinlichkeit für eine einzelne Isolierung und für 100 parallele Isolierungen	65
Tabelle E.1 – Korona-Dämpfungskonstante K_{co}	84
Tabelle E.2 – Faktor A für verschiedene Freileitungen (anwendbar in den Gleichungen (E.17) und (E.19))	89
Tabelle F.1 – Typische Funkenstreckenfaktoren K für einen Schaltstoßdurchschlag Leiter gegen Erde (nach [1] und [4])	95

	Seite
Tabelle F.2 – Funkenstreckenfaktoren für typische Leiter-Leiter-Anordnungen	96
Tabelle G.1 – Zusammenfassung der kleinsten erforderlichen Stehspannungen, die für Beispiel G.1.1 ermittelt wurden (Teil 1, ohne das Schalten von Kondensatoren in der entfernten Station (Station 2))	104
Tabelle G.2 – Zusammenfassung der erforderlichen Stehspannungen aus Beispiel G.1.2 (Teil 2, mit Schalten einer Kondensatorbank in der entfernten Station (Station 2)).....	107
Tabelle G.3 – Werte für das Isolationskoordinationsverfahren für Beispiel G.3.....	123
Tabelle H.1 – Vergleich der Funktionswerte von Bild 9 mit den ausgewählten Parametern aus der Herleitung der m -Kurven mit kritischer Schaltstoßspannung	136
Tabelle I.1 – Bewertung der Blitzüberspannung in GIS von UHV-Netzen	140
Tabelle I.2 – Bewertung der Blitzüberspannung im Transformator eines 500 kV-Netzes.....	143