

AVA Documents
Document Sharing Hub

Nationales Vorwort

Diese Deutsche Fassung der EN 60071-2:1996 wurde vom Komitee 122 „Isolationskoordination“ erarbeitet und zur Veröffentlichung autorisiert.

Die der EN 60071-2:1997 zugrundeliegende Internationale Norm IEC 71-2:1996 hat das Technische Komitee 28 der IEC „Insulation co-ordination“ ausgearbeitet.

Diese Norm enthält den Inhalt der zweiten Ausgabe der IEC 71-2 und ersetzt IEC 71-2:1976, Isolationskoordination, Teil 2: **Anwendungsrichtlinie** und teilweise IEC 71-3:1982, Isolationskoordination, Teil 3: Leiter-Leiter-Isolationskoordination; Grundsätze, Festlegungen und **Anwendungsrichtlinie**.

Der Inhalt von IEC 71-2:1976 sowie der Anhang von IEC 71-3:1982 war in dem Deutschen Normenwerk nur sinngemäß in **DIN 57111-3 (VDE 0111 Teil 3):1982-11** berücksichtigt. Die mit dieser Norm abgelöste Ausgabe baute auf langjährigen Erfahrungen des Betriebes von Hoch- und Höchstspannungsnetzen auf. Sie wird jetzt mit dieser Norm abgelöst.

Diese Anwendungsrichtlinie soll dem besseren Verständnis von **DIN EN 60071-1 (VDE 0111 Teil 1)** dienen und deren sachgerechte Anwendung unterstützen. Sie erhebt nicht den Anspruch, eine vollständige Beschreibung aller für die Isolationskoordination notwendigen Details darzulegen.

Der Titel dieser Norm entspricht der von IEC und CENELEC gegebenen Form. Der früher verwendete Gruppentitel „Isolationskoordination für Betriebsmittel in Drehstromnetzen über 1 kV“ ist aufgrund der CENELEC-Verfahrensregeln nicht mehr möglich.

Der Zusammenhang der zitierten Normen mit den entsprechenden Deutschen Normen ist nachstehend wiedergegeben.

Für den Fall einer undatierten Verweisung im normativen Text (Verweisung auf eine Norm ohne Angabe des Ausgabedatums und ohne Hinweis auf eine Abschnittsnummer, eine Tabelle, ein Bild usw.) bezieht sich die Verweisung auf die jeweils neueste gültige Ausgabe der in Bezug genommenen Norm.

Für den Fall einer datierten Verweisung im normativen Text bezieht sich die Verweisung immer auf die in Bezug genommene Ausgabe der Norm.

Zum Zeitpunkt der Veröffentlichung dieser Norm waren die angegebenen Ausgaben gültig.

Europäische Norm	Internationale Norm	Deutsche Norm	Klassifikation im VDE-Vorschriftenwerk
HD 348 S3:1989 zurückgezogen	IEC 56:1987	Normen der Reihe DIN VDE 0670-101 (VDE 0670 Teil 101):1992-12 DIN VDE 0670-102 (VDE 0670 Teil 102):1992-12 DIN VDE 0670-103 (VDE 0670 Teil 103):1992-10 DIN VDE 0670-104 (VDE 0670 Teil 104):1992-10 DIN VDE 0670-105 (VDE 0670 Teil 105):1992-10 DIN VDE 0670-106 (VDE 0670 Teil 106):1992-10	VDE 0670 Teil 101 VDE 0670 Teil 102 VDE 0670 Teil 103 VDE 0670 Teil 104 VDE 0670 Teil 105 VDE 0670 Teil 106
HD 588.1 S1:1991	IEC 60-1:1989	DIN IEC 60-1 (VDE 0432 Teil 1):1994-06	VDE 0432 Teil 1
EN 60071-1:1995	IEC 71-1:1993	DIN EN 60071-1 (VDE 0111 Teil 1):1996-07	VDE 0111 Teil 1
EN 60099-1:1994	IEC 99-1:1991	DIN EN 60099-1 (VDE 0675 Teil 1):1994-12	VDE 0675 Teil 1
EN 60099-4:1993	IEC 99-4:1991	DIN EN 60099-4 (VDE 0675 Teil 4):1994-05	VDE 0675 Teil 4
–	IEC 505:1975	DIN VDE 0302-1 (VDE 0302 Teil 1): 1986-09	VDE 0302 Teil 1
EN 60507:1993	IEC 507:1991	DIN EN 60507 (VDE 0448 Teil 1):1994-04	VDE 0448 Teil 1
HD 478.2.3 S1:1990	IEC 721-2-3:1987	DIN IEC 721-2-3:1990-06	–
–	IEC 815:1986	–	–

Änderungen

Gegenüber **DIN 57111-3 (VDE 0111 Teil 3):1982-11** wurden folgende Änderungen übernommen:

- Festlegungen von EN 60071-2 wurden unverändert übernommen.

Frühere Ausgaben

DIN 57111-3 (VDE 0111 Teil 3):1982-11

Nationaler Anhang NA (informativ)

Literaturhinweise

DIN EN 60071-1 (VDE 0111 Teil 1)	Isolationskoordination – Teil 1: Begriffe, Grundsätze und Anforderungen (IEC 71-1:1993); Deutsche Fassung EN 60071-1:1995
DIN EN 60099-1 (VDE 0675 Teil 1)	Überspannungsableiter – Teil 1: Überspannungsableiter mit nichtlinearen Widerständen und Funkenstrecken für Wechselspannungsnetze (IEC 99-1:1991); Deutsche Fassung EN 60099-1:1994
DIN EN 60099-4 (VDE 0675 Teil 4)	Überspannungsableiter – Teil 4: Metalloxidableiter ohne Funkenstrecken für Wechselspannungsnetze (IEC 99-4:1991); Deutsche Fassung EN 60099-4:1993
DIN EN 60507 (VDE 0448 Teil 1)	Fremdschichtprüfungen an Hochspannungs-Isolatoren zur Anwendung in Wechselspannungssystemen (IEC 507:1991); Deutsche Fassung EN 60507:1993
DIN IEC 60-1 (VDE 0432 Teil 1)	Hochspannungs-Prüftechnik – Teil 1: Allgemeine Festlegungen und Prüfbedingungen (IEC 60-1:1989 + Corrigendum März 1990); Deutsche Fassung HD 588.1 S1:1991
DIN IEC 721-2-3	Elektrotechnik – Klassifizierung von Umweltbedingungen – Natürliche Einflüsse, Luftdruck – Identisch mit IEC 721-2-3:1987
DIN VDE 0670-101 (VDE 0670 Teil 101)	Wechselstromschaltgeräte für Spannungen über 1 kV – Hochspannungs-Wechselstrom-Leistungsschalter – Allgemeines und Begriffe
DIN VDE 0670-102 (VDE 0670 Teil 102)	Wechselstromschaltgeräte für Spannungen über 1 kV – Hochspannungs-Wechselstrom-Leistungsschalter – Einstufung
DIN VDE 0670-103 (VDE 0670 Teil 103)	Wechselstromschaltgeräte für Spannungen über 1 kV – Hochspannungs-Wechselstrom-Leistungsschalter – Konstruktion und Bau
DIN VDE 0670-104 (VDE 0670 Teil 104)	Wechselstromschaltgeräte für Spannungen über 1 kV – Hochspannungs-Wechselstrom-Leistungsschalter – Typ- und Stückprüfungen
DIN VDE 0670-105 (VDE 0670 Teil 105)	Wechselstromschaltgeräte für Spannungen über 1 kV – Hochspannungs-Wechselstrom-Leistungsschalter – Auswahl von Leistungsschaltern für den Betrieb
DIN VDE 0670-106 (VDE 0670 Teil 106)	Wechselstromschaltgeräte für Spannungen über 1 kV – Hochspannungs-Wechselstrom-Leistungsschalter – Angaben in Anfragen, Angeboten, Bestellungen sowie Hinweise für Transport, Aufstellung und Instandhaltung

Deskriptoren: Isolationskoordination, Hochspannungsnetz, Spannungsbeanspruchung, Isoliervermögen, Schutzeinrichtung, Koordination zwischen Isolationsbeanspruchung und Isoliervermögen

Deutsche Fassung
Isolationskoordination
Teil 2: Anwendungsrichtlinie
(IEC 71-2 : 1996)

Insulation co-ordination
Part 2: Application guide
(IEC 71-2 : 1996)

Coordination de l'isolement
Partie 2: Guide d'application
(CEI 71-2 : 1996)

Diese Europäische Norm wurde von CENELEC am 1996-10-01 angenommen.

Die CENELEC-Mitglieder sind gehalten, die CEN/CENELEC-Geschäftsordnung zu erfüllen, in der die Bedingungen festgelegt sind, unter denen dieser Europäischen Norm ohne jede Änderung der Status einer nationalen Norm zu geben ist.

Auf dem letzten Stand befindliche Listen dieser nationalen Normen mit ihren bibliographischen Angaben sind beim Zentralsekretariat oder bei jedem CENELEC-Mitglied auf Anfrage erhältlich.

Diese Europäische Norm besteht in drei offiziellen Fassungen (Deutsch, Englisch, Französisch). Eine Fassung in einer anderen Sprache, die von einem CENELEC-Mitglied in eigener Verantwortung durch Übersetzung in seine Landessprache gemacht und dem Zentralsekretariat mitgeteilt worden ist, hat den gleichen Status wie die offiziellen Fassungen.

CENELEC-Mitglieder sind die nationalen elektrotechnischen Komitees von Belgien, Dänemark, Deutschland, Finnland, Frankreich, Griechenland, Irland, Island, Italien, Luxemburg, Niederlande, Norwegen, Österreich, Portugal, Schweden, Schweiz, Spanien und dem Vereinigten Königreich.

CENELEC

Europäisches Komitee für Elektrotechnische Normung
European Committee for Electrotechnical Standardization
Comité Européen de Normalisation Electrotechnique

Zentralsekretariat: rue de Stassart 35, B-1050 Brüssel

Vorwort

Der Text des Schriftstücks 28/115/FDIS, zukünftige 3. Ausgabe von IEC 71-2, ausgearbeitet von dem IEC TC 28 „Insulation co-ordination“, wurde der IEC CENELEC Parallelen Abstimmung unterworfen und von CENELEC am 1996-10-01 als EN 60071-2 angenommen.

Diese Europäische Norm ersetzt HD 540.2 S1: 1991 und – gemeinsam mit EN 60071-1: 1995 – HD 540.3 A1: 1991.

Nachstehende Daten wurden festgelegt:

- spätestes Datum, zu dem die EN auf nationaler Ebene durch Veröffentlichung einer identischen nationalen Norm oder durch Anerkennung übernommen werden muß (dop): 1997-09-01
- spätestes Datum, zu dem nationale Normen, die der EN entgegenstehen, zurückgezogen werden müssen (dow): 1997-09-01

Anhänge, die als „normativ“ bezeichnet sind, gehören zum Norminhalt.

Anhänge, die als „informativ“ bezeichnet sind, enthalten nur Informationen.

In dieser Norm sind die Anhänge A und ZA normativ und die Anhänge B bis J informativ.

Der Anhang ZA wurde von CENELEC hinzugefügt.

Anerkennungsnotiz

Der Text der Internationalen Norm IEC 71-2:1996 wurde von CENELEC ohne irgendeine Abänderung als Europäische Norm angenommen.

Inhalt

	Seite
Vorwort	2
Anerkennungsnotiz	2
1 Allgemeines	5
1.1 Anwendungsbereich	5
1.2 Normative Verweisungen	5
1.3 Verwendete Formelzeichen	5
2 Repräsentative Spannungsbeanspruchungen im Betrieb	9
2.1 Ursache und Klassifizierung von Spannungsbeanspruchungen	9
2.2 Eigenschaften von Überspannungsschutzgeräten	10
2.3 Repräsentative Spannungen und Überspannungen	11
3 Koordinationsstehspannung	23
3.1 Eigenschaften der Isolationsfestigkeit	23
3.2 Auswahlkriterium	26
3.3 Verfahren der Isolationskoordination	26
4 Erforderliche Stehspannung	33
4.1 Allgemeines	33
4.2 Atmosphärisch bedingte Korrektur	33
4.3 Sicherheitsfaktoren	35

	Seite
5 Bemessungsspannung und Prüfverfahren	36
5.1 Allgemeines	36
5.2 Prüf-Umrechnungsfaktoren	37
5.3 Bestimmung des Stehvermögens der Isolation durch Typprüfungen	37
6 Spezielle Betrachtungen für Freileitungen	40
6.1 Allgemeines	40
6.2 Isolationskoordination für Betriebsspannungen und zeitweilige Überspannungen	41
6.3 Isolationskoordination für langsam ansteigende Überspannungen	41
6.4 Isolationskoordination für Blitzüberspannungen	41
7 Besondere Überlegungen zu Umspannstationen	42
7.1 Allgemeines	42
7.2 Isolationskoordination für Überspannungen	43
Anhänge	
Anhang A (normativ): Luftstrecken zur Sicherstellung einer festgelegten Stehstoßspannung in Anlagen	45
Anhang B (informativ) Bestimmung zeitweiliger Überspannungen infolge von Erdfehlern	48
Anhang C (informativ): Weibull-Wahrscheinlichkeitsverteilungen	51
Anhang D (informativ): Bestimmung der repräsentativen, langsam ansteigenden Überspannungen für das Einschalten und Wiedereinschalten von Leitungen	55
Anhang E (informativ): Übertragung von Überspannungen in Transformatoren	63
Anhang F (informativ): Blitzüberspannungen	69
Anhang G (informativ): Berechnung der Durchschlagfestigkeit von Luftstrecken aus Versuchsergebnissen	75
Anhang H (informativ): Beispiele zum Verfahren der Isolationskoordination	79
Anhang J (informativ): Literaturhinweise	100
Anhang ZA (normativ): Normative Verweisungen auf Internationale Publikationen mit ihren entsprechenden europäischen Publikationen	101
Tabellen	
Tabelle 1: Empfohlene Kriechstrecken	28
Tabelle 2: Prüf-Umrechnungsfaktoren für den Bereich I zur Umrechnung der erforderlichen Steh-Schaltstoßspannungen (Scheitelwerte) in Kurzzeit-Stehwechselspannungen (Effektivwerte) und Steh-Blitzstoßspannungen (Scheitelwerte)	37
Tabelle 3: Prüf-Umrechnungsfaktoren für den Bereich II zur Umrechnung der erforderlichen Kurzzeit-Stehwechselspannungen (Effektivwerte) in Steh-Schaltstoßspannungen (Scheitelwerte)	37
Tabelle 4: Selektivität der Prüfverfahren B und C nach IEC 60-1	38
Tabelle A.1: Abhängigkeit von Bemessungs-Blitzstoßspannungen und Mindest-Luftstrecken	46
Tabelle A.2: Abhängigkeit von Bemessungs-Schaltstoßspannungen und Mindest-Luftstrecken Leiter gegen Erde	47
Tabelle A.3: Abhängigkeit von Bemessungs-Schaltstoßspannungen und Mindest-Luftstrecken Leiter gegen Leiter	47
Tabelle C.1: Zuordnung von Durchschlagwahrscheinlichkeit und Durchschlagsspannungen für eine Isolierung und für 100 parallele Isolierungen	53
Tabelle F.1: Korona-Dämpfungsfaktoren K_{co}	70
Tabelle F.2: Faktor A für verschiedene Freileitungen	74

Tabelle G.1:	Funkenstreckenfaktoren K von typischen Leiter-Erde-Anordnungen für langsam ansteigende Überspannungen (nach [1] und [2])	78
Tabelle G.2:	Funkenstreckenfaktor für typische Leiter-Leiter-Anordnungen	78
Tabelle H.1:	Zusammenfassung der minimal erforderlichen Stehspannungen, gewonnen für Beispiel H.1.1 (Teil 1, ohne Kondensatorschaltung in der entfernten Station (Station 2))	84
Tabelle H.2:	Zusammenfassung der minimal erforderlichen Stehspannungen aus Beispiel H.1.2 (Teil 2, mit Schalten einer Kondensatorbank in der entfernten Station (Station 2))	86
Tabelle H.3:	Werte zum Isolationskoordinationsverfahren für Beispiel H.3	99

Bilder

Bild 1:	Bereiche der 2 %-Werte langsam ansteigender Überspannungen am Leitungsende beim Einschalten und Wiedereinschalten der Leitung	15
Bild 2:	Verhältnis zwischen den 2 %-Werten von langsam ansteigenden Leiter-Leiter- und Leiter-Erde-Überspannungen	16
Bild 3:	Schema für den Anschluß des Überspannungsableiters an das Schutzobjekt	22
Bild 4:	Durchschlagwahrscheinlichkeit einer selbstheilenden Isolierung bei linear geteilter Ordinate . . .	29
Bild 5:	Durchschlagwahrscheinlichkeit einer selbstheilenden Isolierung bei Gaußgeteilter (normalverteilter) Ordinate	29
Bild 6:	Bestimmung des deterministischen Koordinationsfaktors K_{cd}	30
Bild 7:	Zur Berechnung der Fehlerwahrscheinlichkeit	31
Bild 8:	Fehlerwahrscheinlichkeit einer äußeren Isolierung für langsam ansteigende Überspannungen in Abhängigkeit vom statistischen Koordinationsfaktor K_{cs}	32
Bild 9:	Die Abhängigkeit des Exponenten m im atmosphärischen Korrekturfaktor von der Koordinations-Steh-Schaltstoßspannung	34
Bild 10:	Wahrscheinlichkeit P für das Bestehen der Prüfung eines Betriebsmittels, abhängig von der Differenz K zwischen der aktuellen Stehstoßspannung U_{10} und der Bemessungs-Stoßspannung U_w	39
Bild 11:	Beispiel einer schematischen Schaltanlagenanordnung für die örtliche Zuordnung von Überspannungsbeanspruchungen (siehe 7.1)	42
Bild B.1:	Erdfehlerfaktoren k , abhängig von X_0/X_1 , für $R_1/X_1 = R = 0$	48
Bild B.2:	Abhängigkeit zwischen R_0/X_1 und X_0/X_1 für konstante Werte des Erdfehlerfaktors k , wobei $R_1 = 0$ ist	49
Bild B.3:	Abhängigkeit zwischen R_0/X_1 und X_0/X_1 für konstante Werte des Erdfehlerfaktors k , wobei $R_1 = 0,5 X_1$ ist	49
Bild B.4:	Abhängigkeit zwischen R_0/X_1 und X_0/X_1 für konstante Werte des Erdfehlerfaktors k , wobei $R_1 = X_1$ ist	50
Bild B.5:	Abhängigkeit zwischen R_0/X_1 und X_0/X_1 für konstante Werte des Erdfehlerfaktors k , wobei $R_1 = 2 X_1$ ist	50
Bild C.1:	Diagramm für die Reduzierung der Stehspannung paralleler Isolierungen	54
Bild D.1:	Beispiel für bivariable Komponenten von Leiter-Leiter-Überspannungen bei konstanter Wahrscheinlichkeitsdichte (2 %-Wert-Tangente)	59
Bild D.2:	Prinzipdarstellung zur Bestimmung der repräsentativen Leiter-Leiter-Überspannung U_{pre}	60
Bild D.3:	Schematische Darstellung einer Isolierungsanordnung Leiter-Leiter-Erde	60
Bild D.4:	Darstellung der 50 %-Überschlag-Schaltstoßspannung einer Leiter-Leiter-Erde-Isolation	61
Bild D.5:	Neigungswinkel Φ der Kennlinie der Leiter-Leiter-Isolation im Bereich b, abhängig vom Verhältnis der Leiter-Leiter-Luftstrecke D zur Höhe H_t über dem Erdboden	62
Bild E.1:	Verteilte Wicklungskapazitäten eines Transformators und die Ersatzschaltung für die Wicklungen	67
Bild E.2:	Werte des Faktors J , der den Einfluß der Schaltgruppe auf die induktiv übertragene transiente Überspannung beschreibt	68

1 Allgemeines

1.1 Anwendungsbereich

Dieser Teil der IEC 71 ist eine Anwendungsrichtlinie und gilt für die Auswahl von Isolationspegeln für Betriebsmittel oder Anlagen elektrischer Drehstromnetze. Ihr Zweck besteht darin, eine Anleitung für die Bestimmung von Bemessungsstehspannungen in den Bereichen I und II der **IEC 71-1** zu geben und die Zusammenhänge der Bemessungswerte mit den genormten höchsten Spannungen für Betriebsmittel zu begründen.

Diese Zusammenhänge gelten nur für Zwecke der Isolationskoordination. Anforderungen zur Personensicherheit werden in dieser Anwendungsrichtlinie nicht behandelt.

Die Richtlinie umfaßt Drehstromnetze mit Nennspannungen über 1 kV. Die hier abgeleiteten oder vorgeschlagenen Werte sind im allgemeinen auch nur für solche Netze anzuwenden. Die angegebenen Verfahren sind jedoch auch für Zweiphasen- oder Einphasennetze gültig.

Die Richtlinie umfaßt Isolierungen Leiter gegen Erde und Leiter gegen Leiter sowie Längsisolierungen.

Diese Anwendungsrichtlinie ist nicht zur Behandlung von Stückprüfungen vorgesehen. Diese sind von den zuständigen Gerätekomitees festzulegen.

Der Inhalt dieser Richtlinie folgt dem in **Bild 1 der IEC 71-1** angegebenen Flußdiagramm der Isolationskoordination. Die **Abschnitte 2 bis 5** entsprechen den Schritten in diesem Flußdiagramm und enthalten ausführliche Informationen zur Vorgehensweise bei der Isolationskoordination, die zur Festlegung der erforderlichen Stehspannungspegel führt.

Die Richtlinie unterstreicht die Notwendigkeit, jede Ursache sowie alle Klassen und Arten von Spannungsbeanspruchungen im Betrieb, unabhängig vom Bereich der höchsten Spannung für Betriebsmittel, von Anfang an zu verfolgen. Erst beim letzten Schritt der Isolationskoordination, der Auswahl der genormten Stehspannungen, gilt das Prinzip, eine bestimmte Betriebsbeanspruchung durch eine genormte Stehspannung zu berücksichtigen. Bei diesem letzten Schritt verweist die Richtlinie auf die in **IEC 71-1** eingehaltene Wechselbeziehung zwischen den genormten Isolationspegeln und der höchsten Spannung für Betriebsmittel.

Die Anhänge enthalten Beispiele und ausführliche Informationen, welche die im Haupttextteil beschriebenen Konzeptionen sowie die verwendeten grundsätzlichen analytischen Verfahren erläutern oder untermauern.

1.2 Normative Verweisungen

Die folgenden Normen enthalten Festlegungen, die durch die Hinweise in diesem Text auch für diesen Teil der IEC 71 gelten. Zum Zeitpunkt der Veröffentlichung waren die angegebenen Ausgaben gültig. Alle Normen unterliegen der Überarbeitung. Vertragspartner, deren Vereinbarungen auf dieser Anwendungsrichtlinie basieren, sind gehalten, nach Möglichkeit die neuesten Ausgaben der nachfolgend aufgeführten Normen anzuwenden. IEC- und ISO-Mitglieder verfügen über Verzeichnisse der gegenwärtig gültigen Internationalen Normen.

IEC 56:1987	High-voltage alternating-current circuit-breakers
IEC 60-1:1989	High-voltage test techniques – Part 1: General definitions and test requirements
IEC 71-1:1993	Insulation co-ordination – Part 1: Definitions, principles and rules
IEC 99-1:1991	Surge arresters – Part 1: Non-linear resistor type gapped surge arresters for a.c. systems
IEC 99-4:1991	Surge arresters – Part 4: Metal-oxide surge arresters without gaps for a.c. systems
IEC 99-5:1996	Surge arresters – Part 5: Selection and application recommendations – Section 1: General
IEC 505:1975	Guide for the evaluation and identification of insulation systems of electrical equipment
IEC 507:1991	Artificial pollution test on high-voltage insulators to be used on a.c. systems
IEC 721-2-3:1987	Classification of environmental conditions – Part 2: Environmental conditions appearing in nature – Air pressure
IEC 815:1986	Guide for the selection of insulators in respect of polluted conditions

1.3 Verwendete Formelzeichen

Dieser Abschnitt enthält eine Liste der Formelzeichen, die entsprechend ihrer jeweiligen Definition in dieser Richtlinie verwendet werden. Dem Formelzeichen ist die üblicherweise verwendete Einheit beigefügt, dimensionslose Größen werden durch [-] angegeben.

Manche Größen sind als bezogene Werte (p.u.) angegeben. Eine bezogene Größe ist das Verhältnis des aktuellen Wertes eines elektrischen Parameters (Spannung, Strom, Frequenz, Leistung, Impedanz ...) zu einem gegebenen Bezugswert desselben Parameters.

A	.....	[kV]	Parameter, der – in Abhängigkeit von der Art der Freileitung, die mit dem Betriebsmittel verbunden ist – die Auswirkung eines Blitzeinschlages auf das Betriebsmittel charakterisiert
a_1	.....	[m]	Länge der Verbindungsleitung, die den Überspannungsableiter mit der Freileitung verbindet
a_2	.....	[m]	Länge der Verbindungsleitung, die den Überspannungsableiter mit Erde verbindet
a_3	.....	[m]	Länge des Leiters zwischen dem Überspannungsableiter und dem geschützten Betriebsmittel
a_4	.....	[m]	Länge des aktiven Teils des Überspannungsableiters
B	.....	[-]	Faktor, der zum Beschreiben der Leiter-Leiter-Durch-/Überschlags-Charakteristik verwendet wird
C_e	.....	[nF]	Kapazität von Überspannungs-Transformatorwicklungen gegen Erde
C_s	.....	[nF]	Längskapazität von Überspannungs-Transformatorwicklungen
C_2	.....	[nF]	Leiter-Erde-Kapazität von Transformator-Sekundärwicklungen
C_{12}	.....	[nF]	Kapazität zwischen Primär- und Sekundärwicklungen von Transformatoren
C_{1in}	.....	[nF]	} äquivalente Eingangskapazitäten an Anschlüssen von Drehstromtransformatoren
C_{2in}	.....	[nF]	
C_{3in}	.....	[nF]	
c	.....	[m/μs]	Lichtgeschwindigkeit
c_f	.....	[p.u.]	Spannungs-Koppelfaktor zwischen Erdseil und Leiter von Freileitungen
E_0	.....	[kV/m]	Ionisierungsfeldstärke des Bodens
F	.....	[-]	integrale Verteilungsfunktion von Überspannungsamplituden, wobei $F(U) = 1-p(U)$; siehe Anhang C.3
f	.....	[-]	Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion von Überspannungsamplituden
g	.....	[-]	Verhältnis von kapazitiv übertragenen Impulsspannungen
H	.....	[m]	Höhe über Meeresspiegel
h	.....	[-]	Faktor für betriebsfrequente Spannung für übertragene Stoßspannungen in Transformatoren
Ht	.....	[m]	Höhe über Boden
I	.....	[kA]	Blitzstromamplitude
I_g	.....	[kA]	Grenzblitzstrom bei der Berechnung der Masterdungsimpedanz
J	.....	[-]	Wicklungsfaktor für induktiv übertragene Stoßspannungen in Transformatoren
K	.....	[-]	Funkenstreckenfaktor, der den Einfluß der Funkenstreckenordnung auf die Festigkeit berücksichtigt
K_a	.....	[-]	atmosphärischer Korrekturfaktor [IEC 71-1, 3.28]
K_c	.....	[-]	Koordinationsfaktor [IEC 71-1, 3.25]
K_s	.....	[-]	Sicherheitsfaktor [IEC 71-1, 3.29]
K_{cd}	.....	[-]	deterministischer Koordinationsfaktor
K_{co}	.....	[μs/(kVm)]	Korona-Dämpfungskonstante
K_{cs}	.....	[-]	statistischer Koordinationsfaktor
K_{ff}^+	.....	[-]	Funkenstreckenfaktor für schnell ansteigende Impulse positiver Polarität
K_{ff}^-	.....	[-]	Funkenstreckenfaktor für schnell ansteigende Impulse negativer Polarität
k	.....	[-]	Erdfehlerfaktor [IEC 71-1, 3.15]
L	.....	[m]	Standort-Entfernung zwischen Überspannungsableiter und geschütztem Betriebsmittel
L_a	.....	[m]	Freileitungslänge, die einer akzeptablen Ausfallrate entspricht (bezogen auf R_a)
L_t	.....	[m]	Freileitungslänge, bei der die Blitzausfallrate gleich der akzeptablen Ereignisrate ist (bezogen auf R_t)
L_{sp}	.....	[m]	Spannfeldlänge

M	.....	[-]	Anzahl paralleler Isolierungen, die gleichzeitig von einer Überspannung beansprucht werden
m	.....	[-]	Exponent in der Formel des atmosphärischen Korrekturfaktors für die Festigkeit der äußeren Isolierung
N	.....	[-]	Differenz zwischen U_{50} und U_0 einer selbstleitenden Isolierung, bezogen auf deren Standardabweichung
n	.....	[-]	Anzahl der Freileitungen, die bei der Berechnung der einlaufenden Impulsspannungsamplitude an die Station angeschlossen sind
P	.....	[%]	Durch-/Überschlagswahrscheinlichkeit einer selbstheilenden Isolierung
P_w	.....	[%]	Steh-Wahrscheinlichkeit der selbstheilenden Isolierung
q	.....	[-]	Kopplungsfaktor von Transformatorwicklungen bei induktiv übertragenen Impulsspannungen
R	.....	[-]	Fehlerwahrscheinlichkeit (Fehler je Ereignis)
R_a	.....	[1/a]	akzeptable Fehlerrate für Betriebsmittel; für Übertragungsleitungen wird dieser Parameter üblicherweise in Größen von (1/a)/100 km angegeben
R_{hc}	.....	[Ω]	Hochstrom-Masterdungswiderstand
R_{km}	.....	[1/(m · a)]	Ausfallrate je Jahr einer Freileitungskonstruktion auf dem ersten Kilometer vor der Station
R_{lc}	.....	[Ω]	Masterdungswiderstand bei kleinen Strömen
R_p	.....	[1/a]	Schirmfehlerrate von Freileitungen
R_{sf}	.....	[1/a]	Schirmfehler-Überschlagsrate von Freileitungen
R_t	.....	[1/a]	akzeptable Überspannungs-Ereignisrate (Bezugswert)
R_u	.....	[kV]	Radius eines Kreises in der U^+/U^- -Ebene, der langsam ansteigende Leiter-Leiter-Erde-Überspannungen beschreibt
R_0	.....	[Ω]	Widerstand des Nullsystems
R_1	.....	[Ω]	Widerstand des Mitsystems
R_2	.....	[Ω]	Widerstand des Gegensystems
S	.....	[kV/μs]	Steilheit der in die Station einlaufenden Blitzüberspannung
S_e	.....	[kV]	Standardabweichung der Leiter-Erde-Überspannungsverteilung
S_p	.....	[kV]	Standardabweichung der Leiter-Leiter-Überspannungsverteilung
S_{rp}	.....	[kV/μs]	repräsentative Steilheit einer einlaufenden Blitzüberspannung
s_e	.....	[-]	auf U_{e50} bezogener Wert der Standardabweichung S_e
s_p	.....	[-]	auf U_{p50} bezogener Wert der Standardabweichung S_p
T	.....	[μs]	Laufzeit einer Blitzüberspannung
U	.....	[kV]	Amplitude einer Überspannung (oder einer Spannung)
U^+	.....	[kV]	positive Komponente einer Schaltstoßspannung bei einer Isolationsprüfung Leiter gegen Leiter
U^-	.....	[kV]	negative Komponente einer Schaltstoßspannung bei einer Isolationsprüfung Leiter gegen Leiter
U_0	.....	[kV]	Abbruchwert der Durch-/Überschlag-Verteilungsfunktion $P(U)$ einer selbstheilenden Isolierung: $P(U \leq U_0) = 0$
U_0^+	.....	[kV]	äquivalente positive Leiter-Erde-Komponente, die die kritischste Überspannung Leiter gegen Leiter repräsentiert
U_{1e}	.....	[kV]	zeitweilige Überspannung gegen Erde am Sternpunkt einer Transformator-Primärwicklung
U_{2e}	.....	[kV]	zeitweilige Überspannung gegen Erde am Sternpunkt einer Transformator-Sekundärwicklung
U_{2N}	.....	[kV]	Bemessungsspannung einer Transformator-Sekundärwicklung
U_{10}	.....	[kV]	Wert der 10 %-Durch-/Überschlagsspannung einer selbstheilenden Isolierung; dieser Wert ist die statistische Stehspannung der Isolierung, definiert in IEC 71-1, 3.23b
U_{16}	.....	[kV]	Wert der 16 %-Durch-/Überschlagsspannung bei selbstheilender Isolierung

U_{50}	.....	[kV]	Wert der 50 %-Durch-/Überschlagsspannung bei selbstheilender Isolierung
U_{50M}	.....	[kV]	Wert der 50 %-Durch-/Überschlagsspannung von M parallelen selbstheilenden Isolierungen
U_{50RP}	.....	[kV]	Wert der 50 %-Durch-/Überschlagsspannung einer Stab-Platte-Funkenstrecke
U_c^+	.....	[kV]	positive Komponente, die den Mittelpunkt eines Kreises definiert, der langsam ansteigende Leiter-Leiter-Erde-Überspannungen beschreibt
U_c^-	.....	[kV]	negative Komponente, die den Mittelpunkt eines Kreises definiert, der langsam ansteigende Leiter-Leiter-Erde-Überspannungen beschreibt
U_{cw}	.....	[kV]	Koordinationsstehspannung für Betriebsmittel [IEC 71-1, 3.24]
U_e	.....	[kV]	Amplitude einer Überspannung Leiter gegen Erde
U_{et}	.....	[kV]	Abbruchwert der Verteilungsfunktion $F(U_e)$ von Überspannungen Leiter gegen Erde: $F(U_e \geq U_{et}) = 0$; siehe Anhang C.3
U_{e2}	.....	[kV]	Wert der Leiter-Erde-Überspannung, bei dem die Überschreitungswahrscheinlichkeit 2 % beträgt: $F(U_e \geq U_{e2}) = 0,02$; siehe Anhang C.3
U_{e50}	.....	[kV]	50 %-Wert der Verteilungsfunktion $F(U_e)$ von Überspannungen Leiter gegen Erde; siehe Anhang C.3 .
U_1	.....	[kV]	Amplitude der einlaufenden Blitzüberspannung
U_m	.....	[kV]	höchste Spannung für Betriebsmittel (Effektivwert) [IEC 71-1, 3.10]
U_p	.....	[kV]	Amplitude einer Überspannung Leiter gegen Leiter
U_{p2}	.....	[kV]	Wert der Überspannung Leiter gegen Leiter, mit einer Überschreitungswahrscheinlichkeit von 2 %: $F(U_p \geq U_{p2}) = 0,02$; siehe Anhang C.3
U_{p50}	.....	[kV]	50 %-Wert der Verteilungsfunktion $F(U_p)$ von Überspannungen Leiter gegen Leiter; siehe Anhang C.3
U_s	.....	[kV]	höchste Betriebsspannung des Netzes (Effektivwert) [IEC 71-1, 3.9]
U_w	.....	[kV]	Bemessungsprüfspannung
U_{pl}	.....	[kV]	Blitzstoßschutzpegel eines Überspannungsableiters [IEC 71-1, 3.21]
U_{ps}	.....	[kV]	Schaltstoßschutzpegel eines Überspannungsableiters [IEC 71-1, 3.21]
U_{pt}	.....	[kV]	Abbruchwert der Verteilungsfunktion $F(U_p)$ von Überspannungen Leiter gegen Leiter: $F(U_p \geq U_{pt}) = 0$; siehe Anhang C.3
U_{rp}	.....	[kV]	Amplitude der repräsentativen Überspannung [IEC 71-1, 3.19]
U_{rw}	.....	[kV]	erforderliche Stehspannung [IEC 71-1, 3.27]
U_{T1}	.....	[kV]	eine an der Primärwicklung eines Transformators anliegende Überspannung, die (durch Übertragung) in der Sekundärwicklung eine Überspannung erzeugt
U_{T2}	.....	[kV]	Überspannung an der Sekundärwicklung eines Transformators, die durch eine an der Primärwicklung anliegende Überspannung (durch Übertragung) erzeugt wird
u	.....	[p. u.]	der bezogene Wert der Amplitude einer Überspannung (oder einer Spannung), bezogen auf $U_s \sqrt{2}/\sqrt{3}$
w	.....	[-]	Verhältnis von sekundärer zu primärer Leiter-Leiter-Spannung eines Transformators
X	.....	[m]	Entfernung zwischen Blitzeinschlagstelle und Umspannstation
X_p	.....	[km]	Grenzentfernung auf der Freileitung, innerhalb der Blitzereignisse zu berücksichtigen sind
X_T	.....	[km]	Freileitungslänge, die bei vereinfachten Blitzüberspannungsberechnungen einzusetzen ist
X_0	.....	[Ω]	Nullreaktanz eines Netzes
X_1	.....	[Ω]	Mitreaktanz eines Netzes
X_2	.....	[Ω]	Gegenreaktanz eines Netzes

x	.....	[-]	Standardabweichung auf die bezogene Differenz von U und U_{50} der Verteilungsfunktion $P(U)$ einer selbstheilenden Isolierung
x_M	.....	[-]	Standardabweichung auf die bezogene Differenz von U und U_{50M} der Verteilungsfunktion $P(U)$ von M parallelen selbstheilenden Isolierungen
Z	.....	[kV]	Standardabweichung der Durch-/Überschlagwahrscheinlichkeitsfunktion $P(U)$ einer selbstheilenden Isolierung
Z_0	.....	[Ω]	Nullimpedanz eines Netzes
Z_1	.....	[Ω]	Mitimpedanz eines Netzes
Z_2	.....	[Ω]	Gegenimpedanz eines Netzes
Z_e	.....	[Ω]	Wellenwiderstand des Freileitungs-Erdseiles
Z_l	.....	[Ω]	Wellenwiderstand der Freileitung
Z_M	.....	[kV]	Standardabweichung der Durchschlagwahrscheinlichkeitsfunktion $P(U)$ von M parallelen selbstheilenden Isolierungen
Z_s	.....	[Ω]	Wellenwiderstand des Leiters in der Umspannstation
z	.....	[-]	auf U_{50} bezogener Wert der Standardabweichung Z
α	.....	[-]	Verhältnis der negativen Schaltstoßspannungskomponente zur Summe beider Komponenten (negative + positive) einer Überspannung Leiter gegen Leiter
β	.....	[kV]	Maßstabsparameter einer Weibull-Verteilungsfunktion
δ	.....	[kV]	Abbruchwert einer Weibull-Verteilungsfunktion
Φ	.....		normierte Gaußsche Verteilungsfunktion
ϕ	.....	[-]	Neigungswinkel einer Leiter-Leiter-Isolationskennlinie
γ	.....	[-]	Formparameter einer Weibull-3-Summenfunktion
σ	.....	[p.u.]	bezogener Wert der Standardabweichung (S_e oder S_p) einer Überspannungsverteilung
ρ	.....	[Ωm]	spezifischer Erdbodenwiderstand
τ	.....	[μs]	Rückzeitkonstante einer Blitzüberspannung bei rückwärtigen Überschlägen auf Freileitungen

2 Repräsentative Spannungsbeanspruchungen im Betrieb

2.1 Ursache und Klassifizierung von Spannungsbeanspruchungen

In IEC 71-1 sind die Spannungsbeanspruchungen durch geeignete Parameter, z. B. Dauer der betriebsfrequenten Spannung oder die Form einer Überspannung, entsprechend ihrer Auswirkung auf die Isolierung oder das Schutzgerät klassifiziert. Die Spannungsbeanspruchungen in diesen Klassen haben verschiedene Ursachen:

- betriebsfrequente Dauerspannungen: bedingt durch den bestimmungsgemäßen Netzbetrieb;
- zeitweilige Überspannungen: diese können bedingt sein durch Fehler, Schaltvorgänge (wie z. B. Lastabwurf), Resonanzbedingungen, Nichtlinearitäten (Ferroresonanzen) oder eine Kombination von diesen;
- langsam ansteigende Überspannungen: diese können durch Fehler, Schaltvorgänge oder direkte Blitzeinschläge in die Leiter von Freileitungen bedingt sein;
- schnell ansteigende Überspannungen: diese können durch Schaltvorgänge, Blitzeinschläge oder Fehler bedingt sein;
- sehr schnell ansteigende Überspannungen: diese können durch Fehler oder Schaltvorgänge in gasisolierten Schaltanlagen (GIS) bedingt sein;
- kombinierte Überspannungen: diese können durch jede der vorgenannten Ursachen bedingt sein. Sie treten zwischen den Leitern eines Netzes auf (Leiter-Leiter-Isolierung) oder an dem gleichen Leiter zwischen getrennten Netzteilen (Längsisolierung).

In 2.3 werden alle vorstehend aufgeführten Überspannungsbeanspruchungen als gesonderte Punkte behandelt, kombinierte Überspannungen ausgenommen. Kombinierte Überspannungen werden, je nach Zweckmäßigkeit, in einem oder mehreren dieser Punkte behandelt.

Bei allen Klassifizierungen von Spannungsbeanspruchungen sollte die Übertragung durch Transformatoren berücksichtigt werden (siehe Anhang E).

Im allgemeinen können alle Klassen von Überspannungen in den beiden Spannungsbereichen I und II vorhanden sein. Die Erfahrung hat jedoch gezeigt, daß bestimmte Überspannungsklassen in einem bestimmten Spannungsbereich eine wesentlich höhere Bedeutung haben; das wird in dieser Richtlinie behandelt. Auf jeden Fall sollte angemerkt sein, daß die beste Kenntnis über Beanspruchungen (Scheitelwerte und Formen) durch eingehende Untersuchungen erzielt wird, wobei angemessene Modelle für das Netz und für die Kennlinien von Überspannungsschutzgeräten verwendet werden.

2.2 Eigenschaften von Überspannungsschutzgeräten

2.2.1 Allgemeines

Es werden zwei genormte Ausführungen von Schutzeinrichtungen in Betracht gezogen:

- Überspannungsableiter mit nichtlinearen Widerständen und Funkenstrecken in Reihenschaltung;
- Metalloxid-Überspannungsableiter ohne Funkenstrecken.

Außerdem werden Funkenstrecken als alternative Überspannungsschutzgeräte betrachtet, obwohl dafür innerhalb der IEC keine Normen vorhanden sind. Wenn andere Schutzeinrichtungsarten verwendet werden, muß deren Schutzverhalten durch den Hersteller angegeben sein oder durch Versuche festgestellt werden. Die Auswahl unter den Schutzeinrichtungen, die nicht den gleichen Schutzgrad bieten, ist von verschiedenen Faktoren abhängig, z. B. Bedeutung des zu schützenden Betriebsmittels, Folgen einer Betriebsunterbrechung usw. Ihre Eigenschaften werden nachstehend vom Standpunkt der Isolationskoordination betrachtet, und die Auswirkungen werden in den Abschnitten behandelt, die sich mit den verschiedenen Überspannungsklassen beschäftigen.

Die Schutzeinrichtungen sollten so ausgelegt und installiert sein, daß die Überspannungswerte an dem geschützten Betriebsmittel begrenzt werden. Das bedeutet, daß die Spannung an der Schutzeinrichtung und den Verbindungsleitungen während des Ansprechens einen zulässigen Wert nicht überschreitet. Wichtig ist dabei, daß die an den Anschlußklemmen des Überspannungsableiters entstehende Spannung zu jedem Zeitpunkt vor und während des Ansprechens für die Festlegung der Schutzcharakteristiken berücksichtigt werden muß.

2.2.2 Überspannungsableiter mit nichtlinearen Widerständen und Funkenstrecken

Sofern der Überspannungsableiter einen nichtlinearen Siliciumcarbid-Widerstand mit einer Funkenstrecke in Reihenschaltung enthält, sind die Charakteristiken in IEC 99-1 gegeben. Wenn jedoch der Überspannungsableiter aus einem nichtlinearen Metalloxidwiderstand mit einer Funkenstrecke in Reihe besteht, können die Charakteristiken von den in IEC 99-1 angegebenen abweichen. Die Auswahl von Überspannungsableitern wird künftig in der IEC 99-5 behandelt.

2.2.2.1 Schutzcharakteristiken bei schnell ansteigenden Überspannungen

Die Schutzcharakteristiken eines Überspannungsableiters werden durch folgende Spannungen beschrieben (siehe Tabelle 8 der IEC 99-1):

- die Ansprechspannung für eine genormte Vollwelle der Blitzstoßspannung;
- die Restspannung bei dem gewählten Nenn-Ableitstoßstrom;
- die Stirn-Ansprechstoßspannung.

Der Schutzpegel bei Blitzstoßspannung wird als der höchste der folgenden Werte angenommen:

- maximale Ansprechspannung bei Stoßspannung mit $1,2/50 \mu\text{s}$;
- maximale Restspannung bei dem gewählten Nenn-Ableitstoßstrom.

Diese Ermittlung des Schutzpegels ergibt einen Wert, der eine allgemein annehmbare Näherung darstellt. Für ausführlichere Angaben zum Schutzverhalten von in der Wellenstirn ansprechenden Überspannungsableitern sollte auf die IEC 99-1 verwiesen werden.

ANMERKUNG: Traditionell wurde die durch 1,15 dividierte Stirnansprechspannung in die Bestimmung des Blitzstoßschutzpegels einbezogen. Da der Faktor 1,15 technisch nur für Ölpapier-Isolierung oder in Öl getränkte Isolierung – wie bei Transformatoren – begründet ist, kann seine Anwendung auf andere Arten von Betriebsmitteln zu einer Ausführung mit vermindertem Isolationsvermögen führen. Diese Alternative ist deshalb bei der Bestimmung des Blitzstoß-Schutzpegels weggelassen worden.

2.2.2.2 Schutzcharakteristiken bei langsam ansteigenden Überspannungen

Der Schutz eines Überspannungsableiters wird durch die Ansprechspannungen für die in IEC 99-1, 8.3.5, festgelegten Formen der Schaltstoßspannung gekennzeichnet.

Der Schutzpegel eines Überspannungsableiters bei Schaltstoßspannung ist die maximale Ansprechspannung für diese Stoßspannungsform.

Wenn der Überspannungsableiter aktive (magnetisch beblasene) Funkenstrecken enthält, muß die Gesamtspannung, die beim Begrenzen von Schaltüberspannungen entsteht und höher als die Ansprechspannung sein kann, vom Hersteller erfragt werden.

2.2.3 Metalloxid-Überspannungsableiter ohne Funkenstrecken

Die Definition für solche Überspannungsableiter und deren Charakteristiken sind in IEC 99-4 enthalten.

2.2.3.1 Schutzcharakteristiken bei schnell ansteigenden Überspannungen

Der Schutz eines Metalloxid-Überspannungsableiters ist durch folgende Spannungen gekennzeichnet:

- die Restspannung bei dem gewählten Nenn-Ableitstoßstrom;
- die Restspannung bei einem steilen Stoßstrom.

Für den Schutzpegel bei Blitzstoßspannung wird für Zwecke der Isolationskoordination die maximale Restspannung bei gewähltem Nenn-Ableitstoßstrom angewendet.

2.2.3.2 Schutzcharakteristiken bei langsam ansteigenden Überspannungen

Der Schutz wird durch die Restspannung bei typischen Stoßströmen infolge von Schaltüberspannungen gekennzeichnet.

Der Schutzpegel wird für die Isolationskoordination als maximale Restspannung bei den typischen Stoßströmen infolge von Schaltüberspannungen angenommen.

Diese Festlegung von Schutzpegeln ergibt einen Wert, der eine allgemein annehmbare Näherung darstellt. Hinsichtlich einer besseren Definition zum Schutzverhalten von Metalloxid-Überspannungsableitern wird auf IEC 99-4 verwiesen.

2.2.4 Funkenstrecken

Die Funkenstrecke ist ein Überspannungsschutzgerät, das aus einer offenen Luftfunkenstrecke zwischen den Anschlüssen des geschützten Betriebsmittels besteht. Obwohl in Netzen, in denen U_m gleich oder höher als 123 kV ist, Funkenstrecken gewöhnlich nicht eingesetzt werden, haben sie sich in einigen Ländern mit mäßiger Blitzhäufigkeit in Netzen mit Betriebsspannungen bis 420 kV für die Praxis als ausreichend erwiesen. Die Funkenstreckeneinstellung ist häufig ein Kompromiß zwischen dem erreichbaren Schutz und den Folgen aus dem Ansprechen der Funkenstrecke.

Der Schutz gegen Überspannungen ist durch die Spannung/Zeit-Kennlinie der Funkenstrecke für die verschiedenen Spannungsformen, die Streuung der Ansprechspannung und ihre Polaritätsabhängigkeit gekennzeichnet. Da keine Norm existiert, müssen diese Charakteristiken vom Hersteller angefordert oder vom Betreiber auf der Grundlage eigener Spezifikationen festgelegt werden.

ANMERKUNG: Der schnelle Spannungszusammenbruch mit möglichen Folgen an Wicklungsisolierungen muß als Eigenschaft der Überspannung in Betracht gezogen werden.

2.3 Repräsentative Spannungen und Überspannungen

2.3.1 Betriebswechselspannungen

Unter bestimmungsgemäßen Betriebsbedingungen kann erwartet werden, daß die betriebsfrequente Spannung im Betrag etwas schwankt und von einem Netzpunkt zum anderen unterschiedlich ist. Für die Auslegung der Isolierung und somit zur Isolationskoordination sollte die repräsentative betriebsfrequente Dauerspannung als konstant angesehen werden und gleich der höchsten Netzspannung sein. In der Praxis kann bis $U_m \leq 72,5$ kV die höchste Netzspannung U_s niedriger als die Bemessungs-Prüfspannung für Betriebsmittel U_m sein. Mit steigender Netzspannung nähern sich die Werte U_m und U_s einander an.

2.3.2 Zeitweilige Überspannungen

Zeitweilige Überspannungen sind durch ihre Amplituden, ihre Spannungsform und ihre Dauer gekennzeichnet. Alle Parameter sind von der Überspannungsursache abhängig. Amplituden und Formen können sich während der Überspannungsdauer ändern.

Für die Isolationskoordination kann die Form der Überspannung der Form der betriebsfrequenten Spannung gleichgesetzt werden. Die repräsentative zeitweilige Überspannung hat die Form der genormten Kurzzeit-Wechselspannung und kann beschrieben werden durch einen angenommenen Maximalwert oder eine Gruppe von Scheitelwerten oder eine komplette Verteilungsfunktion der Scheitelwerte. Für die gewählte Amplitude der repräsentativen zeitweiligen Überspannung muß folgendes berücksichtigt werden:

- die Amplitude und Dauer der tatsächlich im Betrieb auftretenden Überspannung;
- die betriebsfrequente Amplitude/Dauer-Festigkeitscharakteristik der betrachteten Isolierung.

Wenn die letztgenannte Charakteristik nicht bekannt ist, kann zur Vereinfachung die Amplitude genommen werden, die gleich der aktuellen maximalen Überspannung ist (Dauer: 1 min).

In besonderen Fällen darf ein statistisches Koordinierungsverfahren angewendet werden, das die repräsentative Überspannung durch eine Amplituden/Dauer-Häufigkeitsverteilung der im Betrieb zu erwartenden zeitweiligen Überspannungen beschreibt (siehe 3.3.1).

2.3.2.1 Erdfehler

Der Erdfehler eines Leiters kann zu Überspannungen Leiter gegen Erde führen, die die beiden anderen Leiter beeinträchtigen. Zwischen Leitern oder über der Längsisolierung treten dabei gewöhnlich keine zeitweiligen Überspannungen auf. Die Überspannung ist eine betriebsfrequente Spannung.

Die Überspannungsamplituden sind von der Sternpunktterdung des Netzes und der Fehlerstelle abhängig. Eine Anleitung für ihre Bestimmung ist in [Anhang B](#) gegeben. Bei üblichen Netzanordnungen sollte die repräsentative Überspannungsamplitude gleich ihrem Höchstwert angenommen werden. Ungewöhnliche Netzanordnungen, z. B. Netzteile mit nichtgeerdeten Sternpunkten in einem Netz mit bestimmungsgemäß niederohmiger Sternpunktterdung, sollten gesondert behandelt werden, wobei die Wahrscheinlichkeit des gleichzeitigen Auftretens mit Erdfehlern in Betracht zu ziehen ist.

Die Dauer der Überspannung entspricht der Fehlerdauer (bis zur Fehlerabschaltung). In Netzen mit niederohmiger Sternpunktterdung beträgt sie im allgemeinen weniger als 1 s. In Netzen mit Erdschlußkompensation und Fehlerabschaltung beträgt sie im allgemeinen weniger als 10 s. In Netzen ohne Erdfehlerabschaltung kann die Dauer mehrere Stunden betragen. In solchen Fällen kann es notwendig sein, die betriebsfrequente Dauerspannung als den Wert der zeitweiligen Überspannung während eines Erdfehlers zu definieren.

ANMERKUNG: Die höchste betriebsfrequente Spannung, die an einem fehlerfreien Leiter während eines Erdfehlers auftreten kann, ist nicht nur von dem Erdfehlerfaktor, sondern auch von dem Wert der Betriebsspannung zum Zeitpunkt des Fehlers abhängig. Als Wert kann die höchste Betriebsspannung eines Netzes U_s angenommen werden.

2.3.2.2 Lastabwurf

Leiter-Erde-Überspannungen und zeitweilige Längsüberspannungen bei Lastabwurf sind von der Höhe der abgeworfenen Last, vom Netzzustand nach der Abschaltung und von den Charakteristiken der Spannungsquellen (Kurzschlußleistung in der Station, Drehzahl- und Spannungsregelung der Generatoren usw.) abhängig.

Die Spannungserhöhungen der drei Leiter gegen Erde sind gleich, und demzufolge treten die gleichen bezogenen Leiter-Erde- und Leiter-Leiter-Überspannungen auf. Diese Spannungserhöhungen können im Fall des Lastabwurfes am fernen Ende einer langen Leitung (Ferranti-Effekt) besonders wichtig sein. Sie beeinflussen hauptsächlich die Betriebsmittel, die sich in der entfernten Station auf der Leitungsseite bei offenem Leistungsschalter befinden.

Die zeitweiligen Längsüberspannungen sind von der Differenz der Phasenwinkel nach der Netztrennung abhängig, wobei der ungünstigste Fall Gegenphasigkeit ist.

ANMERKUNG: Bezüglich der Überspannungen sollte zwischen verschiedenen Arten von Netzanordnungen unterschieden werden. Als Beispiele können folgende Extremfälle in Betracht gezogen werden:

- Netze mit verhältnismäßig kurzen Leitungen und hoher Kurzschlußleistung an den Stationen, wo geringe Überspannungen auftreten;
- Netze mit langen Leitungen und geringer Kurzschlußleistung auf der Speiseseite, die beim Aufbau eines Höchstspannungsnetzes auftreten. Hier können sehr hohe Überspannungen entstehen, wenn eine große Last plötzlich abgeschaltet wird.

Bei der Analyse von zeitweiligen Überspannungen wird empfohlen, folgendes zu berücksichtigen (der 1,0-p.u.-Wert ist gleich $\sqrt{2} U_s / \sqrt{3}$):

- In mäßig ausgedehnten Netzen kann ein vollständiger Lastabwurf Anlaß für Leiter-Erde-Überspannungen sein, deren Amplitude gewöhnlich kleiner als 1,2 p.u. ist. Die Überspannungsdauer ist vom Ansprechen der Spannungsregleinrichtung abhängig und kann mehrere Minuten betragen.
- In ausgedehnten Netzen können, nach einem vollständigen Lastabwurf, die Leiter-Erde-Überspannungen 1,5 p.u. erreichen. Gelegentlich noch mehr, wenn Ferranti- oder Resonanz-Effekte auftreten. Ihre Dauer kann in der Größenordnung von einigen Sekunden liegen.
- Wenn sich auf der Abwurfseite nur stationäre Lasten befinden, ist die zeitweilige Längsüberspannung gewöhnlich gleich der Überspannung Leiter gegen Erde. In Netzen mit Motoren oder Generatoren auf der Abwurfseite kann eine Netztrennung Anlaß für eine zeitweilige Längsüberspannung sein, die sich aus zwei Leiter-Erde-Überspannungskomponenten in Phasenopposition zusammensetzt. Dabei ist ihre maximale Amplitude gewöhnlich kleiner als 2,5 p.u. (Größere Werte können in Ausnahmefällen beobachtet werden, z. B. bei sehr ausgedehnten Hochspannungsnetzen.)

2.3.2.3 Resonanz und Ferroresonanz

Durch diese Ursachen bedingte zeitweilige Überspannungen entstehen im allgemeinen infolge von Lastabwürfen oder dann, wenn Stromkreise mit großen kapazitiven Elementen (Leitungen, Kabeln, reihenkompensierten Leitungen) und induktiven Elementen, die nichtlineare Magnetisierungskennlinien aufweisen (Transformatoren, Nebenschlußdrosseln), zugeschaltet werden.

Durch Resonanzerscheinungen bedingte zeitweilige Überspannungen können extrem hohe Werte erreichen. Sie sollten verhindert oder durch die in [2.3.2.6](#) empfohlenen Maßnahmen begrenzt werden. Sie sollten deshalb nicht als Grundlage für die Auswahl der Bemessungsspannung von Überspannungsableitern oder für den Isolierungs-

aufbau von Innenisolierungen verwendet werden, es sei denn, diese Abhilfemaßnahmen erweisen sich als unzureichend (siehe 2.3.2.7).

2.3.2.4 Längsüberspannungen während des Synchronisierens

Die repräsentativen zeitweiligen Längsüberspannungen sind von der erwarteten Überspannung im Betrieb abgeleitet, deren Amplitude dem zweifachen Wert der Betriebsspannung Leiter gegen Erde entspricht und eine Dauer von mehreren Sekunden bis zu einigen Minuten erreicht.

Außerdem sollten, wenn das Synchronisieren häufig erfolgt, die Wahrscheinlichkeit des Auftretens eines Erdfehlers und die daraus folgende Überspannung in Betracht gezogen werden. In solchen Fällen bestehen die repräsentativen Überspannungsamplituden aus der Summe der angenommenen maximalen Erdfehlerüberspannung an dem einem Anschlußpunkt und der Dauerbetriebsspannung in Phasenopposition an dem anderen.

2.3.2.5 Kombinationen zeitweiliger Überspannungen mit verschiedenen Ursachen

Zeitweilige Überspannungen unterschiedlichen Ursprungs sollten nur nach sorgfältiger Untersuchung der Wahrscheinlichkeit ihres gleichzeitigen Auftretens als Kombination behandelt werden. Solche Kombinationen können zu höheren Bemessungswerten für Überspannungsableiter führen, mit der Folge höherer Schutz- und Isolationspegel; dies ist technisch und wirtschaftlich nur dann gerechtfertigt, wenn die Wahrscheinlichkeit des gleichzeitigen Auftretens ausreichend hoch ist.

2.3.2.5.1 Erdfehler mit Lastabwurf

Die Kombination Erdfehler mit Lastabwurf besteht dann, wenn während eines Fehlers auf einer Leitung der lastseitige Leistungsschalter zuerst öffnet. Die abgeschaltete Last verursacht eine Lastabwurf-Überspannung in dem Netzeil, das bis zum Öffnen des speiseseitigen Leistungsschalters noch fehlerbehaftet ist.

Die Kombination Erdfehler mit Lastabwurf kann auch dann bestehen, wenn eine große Last abgeschaltet wird und die dabei entstehende zeitweilige Überspannung einen anschließenden Erdfehler in dem übriggebliebenen Netz verursacht. Die Wahrscheinlichkeit eines solchen Ereignisses ist jedoch gering, wenn die durch die Laständerung bedingten Überspannungen selbst klein sind. Ein nachfolgender Fehler kann dann nur bei extremen Bedingungen eintreten, wie z. B. bei starker Verschmutzung.

Die Kombination kann auch als Folge eines Leitungsfehlers mit anschließendem Versagen beim Öffnen eines Leistungsschalters auftreten. Die Wahrscheinlichkeit einer solchen Kombination ist zwar gering, jedoch nicht zu vernachlässigen, da diese Ereignisse nicht statistisch unabhängig sind. Ein solches Ereignis, das in einem Generator entsteht, der durch einen Transformator mit einer fehlerbehafteten langen Leitung verbunden ist, kann zu einer beträchtlichen Überspannung an den fehlerfreien Leitern führen. Die Überspannung besteht aus einer langsam ansteigenden Überspannung und einer zeitweiligen Überspannung, die eine Funktion der Generatoreigenschaften sowie der Wirkungen des Spannungsreglers ist.

Wenn solche Kombinationen als möglich erachtet werden, sind Netzuntersuchungen zu empfehlen. Ohne solche Untersuchungen könnte man meinen, daß die Kombination dieser Überspannungen erforderlich ist, was jedoch aus folgenden Gründen zu pessimistisch ist:

- Der Erdfehlerfaktor ändert sich, wenn er mit der Lastabwurf-Überspannung in Verbindung steht.
- Der Netzzustand hat sich nach der Laständerung verändert. Der Erdfehlerfaktor ist zum Beispiel bei Blocktransformatoren mit geerdetem Sternpunkt nach der Abschaltung vom Netz kleiner als 1.
- Bei Netztransformatoren ist der Verlust der vollen Bemessungslast nicht üblich.

2.3.2.5.2 Sonstige Kombinationen

Da Resonanzerscheinungen vermieden werden sollten, sind Kombinationen mit anderen Ursachen nur als zusätzliches Ergebnis ihrer selbst anzusehen. In manchen Netzen ist es nicht ohne weiteres möglich, Resonanzerscheinungen zu vermeiden. In solchen Netzen ist es wichtig, eingehende Untersuchungen durchzuführen.

2.3.2.6 Begrenzung zeitweiliger Überspannungen

2.3.2.6.1 Erdfehler-Überspannungen

Erdfehler-Überspannungen sind von den Netzparametern abhängig und können nur durch Auswahl dieser Parameter während der Netzprojektierung beeinflußt werden. Die Überspannungsamplituden sind gewöhnlich in Netzen mit direkter Sternpunktterdung nicht so stark ausgeprägt. Eine Ausnahme besteht jedoch in Netzen mit direkter Sternpunktterdung, bei denen in ungewöhnlichen Situationen ein Netzeil mit isolierten Transformator-Sternpunkten abgetrennt werden kann. In einer solchen Situation kann die Dauer durch Erdfehler bedingter, hoher Überspannungen im abgetrennten Teil dadurch beeinflußt werden, daß mit Hilfe von Schaltern oder besonders ausgewählten Sternpunkt-Überspannungsableitern eine schnelle Erdung der Sternpunkte durchgeführt wird.

2.3.2.6.2 Plötzliche Laständerungen

Diese Überspannungen können durch Ladestromspulen, Reihenkapazitoren oder statische Kompensatoren begrenzt werden.

2.3.2.6.3 Resonanz und Ferroresonanz

Diese Überspannungen sollten durch Verstärken des Netzes gegenüber der Resonanzfrequenz begrenzt werden, indem die Netzanordnung geändert wird oder Dämpfungswiderstände eingesetzt werden.

2.3.2.7 Schutz gegen zeitweilige Überspannungen mit Überspannungsableitern

Gewöhnlich ist die Auswahl der Bemessungsspannung für den Überspannungsableiter mit der Hüllkurve der zu erwartenden zeitweiligen Überspannung begründet, wobei das Energieableitvermögen des Überspannungsableiters zu berücksichtigen ist. Im allgemeinen ist die Zuordnung der Bemessungswerte für den Überspannungsableiter hinsichtlich der Beanspruchung durch die zeitweilige Überspannung im Bereich II kritischer, da die Margen kleiner als im Bereich I sind. Gewöhnlich wird das Energieableitvermögen des Überspannungsableiters bei Beanspruchung durch die zeitweilige Überspannung als eine Amplitude/Dauer-Charakteristik angegeben, die vom Hersteller geliefert wird.

Für praktische Zwecke begrenzen Überspannungsableiter die zeitweiligen Überspannungen nicht. Eine Ausnahme besteht für zeitweilige Überspannungen infolge von Resonanzeffekten. Hierfür dürfen Überspannungsableiter zur Begrenzung bzw. Vermeidung von Überspannungen eingesetzt werden. Für einen solchen Anwendungsfall sollten sorgfältige Untersuchungen zu thermischen Beanspruchungen an Überspannungsableitern durchgeführt werden, um deren Überlastung zu vermeiden.

2.3.3 Langsam ansteigende Überspannungen

Langsam ansteigende Überspannungen weisen Schwingungen auf und haben Stirndauern von einigen zehn bis einigen tausenden von Mikrosekunden und Rückenzeiten in derselben Größenordnung. Sie entstehen im allgemeinen durch:

- Einschalten und Wiedereinschalten einer Leitung;
- Fehlereintritt und Fehlerabschaltung;
- Lastabwürfe;
- Schalten von kapazitiven oder induktiven Strömen;
- ferne Blitzeinschläge in Leiter von Freileitungen.

Die repräsentative Spannungsbeanspruchung ist gekennzeichnet durch:

- eine repräsentative Spannungsform;
- eine repräsentative Amplitude, die entweder eine angenommene maximale Überspannung oder eine Wahrscheinlichkeitsverteilung der Überspannungsamplituden ist.

Die repräsentative Spannungsform ist die genormte Schaltstoßspannung (Scheitelzeit 250 μ s und Rückenhalbwertzeit 2 500 μ s). Die repräsentative Amplitude ist die Amplitude der Überspannung, die unabhängig von ihrer aktuellen Scheitelzeit betrachtet wird. In manchen Netzen des Bereiches II können Überspannungen mit sehr langen Stirnzeiten auftreten, und die repräsentative Amplitude kann abgeleitet werden, indem der Einfluß der Stirnzeit auf die dielektrische Festigkeit der Isolierung berücksichtigt wird.

Die Wahrscheinlichkeitsverteilung von Überspannungen ohne Ansprechen eines Überspannungsableiters wird durch ihren 2 %-Wert, ihre Streuung und ihren Abbruchwert gekennzeichnet. Obwohl es nicht ganz zutrifft, kann die Wahrscheinlichkeitsverteilung zwischen dem 50 %-Wert und dem Abbruchwert – wobei angenommen wird, daß keine darüberliegenden Werte existieren – durch eine Gaußsche Verteilung näherungsweise bestimmt werden. Alternativ kann eine modifizierte Weibull-Verteilung verwendet werden (siehe [Anhang C](#)).

Der angenommene Höchstwert der repräsentativen Überspannung ist gleich dem Abbruchwert dieser Überspannungen (siehe 2.3.3.1 bis 2.3.3.6) oder gleich dem Schaltstoßschutzpegel des Überspannungsableiters (siehe 2.3.3.7), je nachdem, welcher Wert der kleinere ist.

2.3.3.1 Überspannungen beim Einschalten und Wiedereinschalten von Leitungen

Ein dreipoliges Einschalten oder Wiedereinschalten einer Leitung erzeugt Schaltüberspannungen an allen drei Leitern der Leitung. Dementsprechend erzeugt jede Schalthandlung drei Leiter-Erde- und drei Leiter-Leiter-Überspannungen [1]*).

Bei der praktischen Ermittlung von Überspannungen wurden verschiedene Vereinfachungen eingeführt. Bezüglich der Anzahl von Überspannungen pro Schalthandlung sind zwei Methoden gebräuchlich:

- **Methode der Leiter-bezogenen Überspannungsermittlung:** Für jede Schalthandlung wird der höchste Überspannungs-Scheitelwert eines jeden Leiters gegen Erde oder zwischen jeder Kombination von Leitern für die Überspannungs-Verteilungsfunktion verwendet. Das bedeutet, jede Schalthandlung trägt mit drei Scheitelwerten zur repräsentativen Überspannungsverteilung bei. Diese Verteilung wird für alle drei Isolierungsarten (Leiter-Erde, Leiter-Leiter oder Längsisolierung) gleich angenommen.

*) Zahlen in eckigen Klammern verweisen auf die Literaturhinweise des [Anhangs J](#).

- **Methode der Fall-bezogenen Überspannungsermittlung:** Für jede Schalthandlung wird der höchste Überspannungs-Scheitelwert von allen drei Leitern gegen Erde oder zwischen allen drei Leitern für die Überspannungs-Verteilungsfunktion verwendet. Das bedeutet, jede Schalthandlung trägt mit einem Wert zur repräsentativen Überspannungs-Verteilung bei. Diese Verteilung ist dann auf eine Isolierung der verschiedenen Arten anwendbar.

Die Überspannungsamplituden infolge Leitungs-Einschalten sind von mehreren Faktoren abhängig, wie Leistungsschalterttyp mit oder ohne Einschaltwiderstände, Art und Kurzschlußleistung der die Leitung speisenden Sammelschiene, Art der verwendeten Kompensation sowie die Länge der eingeschalteten Leitung, Art des Leitungsendes (offen, Transformator, Überspannungsableiter) usw.

Dreipoliges Wiedereinschalten kann durch liegengebliebene Ladungen auf der wiedereingeschalteten Leitung hohe, langsam ansteigende Überspannungen erzeugen. Zum Zeitpunkt der Wiedereinschaltung kann die Amplitude der auf der Leitung anstehenden Überspannung (durch Restladungen bedingt) so hoch wie der Scheitelwert der zeitweiligen Überspannung sein. Die Entladung dieser Ladung ist von den Betriebsmitteln, die mit der Leitung verbunden bleiben, sowie von der Oberflächenleitfähigkeit der Isolatoren, von den Koronabedingungen der Leiter und von der Wiedereinschaltzeit abhängig.

Bei üblichen Netzen erzeugt einpoliges Wiedereinschalten keine höheren Überspannungen als Einschalten. Bei Leitungen, bei denen Ferranti- oder Resonanz-Effekte von Bedeutung sein können, kann einpoliges Wiedereinschalten zu höheren Überspannungen führen als dreipoliges Einschalten.

Die exakten Wahrscheinlichkeitsverteilungen der Überspannungsamplituden können nur durch sorgfältige Nachbildung von Schaltvorgängen mit Hilfe von Digitalrechnern, Simulatoren usw. ermittelt werden. Solch typische Werte wie die in Bild 1 dargestellten sollten nur als grobe Richtlinie angesehen werden. Alle Betrachtungen dort sind auf die Überspannungen am offenen Ende der Leitung bezogen. Die Überspannungen am Einspeisungsende können wesentlich kleiner als die am offenen Ende der Leitung sein. Aus Gründen, die in [Anhang D](#) beschrieben werden, kann Bild 1 für beide Methoden der Überspannungsermittlung (Leiter-bezogen oder Fall-bezogen) verwendet werden.

2.3.3.1.1 Überspannungen Leiter – Erde

Ein Verfahren zur Bestimmung der Wahrscheinlichkeitsverteilung von repräsentativen Überspannungen ist in [Anhang D](#) gegeben.

Als grobe Übersicht zeigt Bild 1 den Bereich der 2 %-Überspannungswerte (auf $\sqrt{2} U_s/\sqrt{3}$ bezogenen), die zwischen Leiter und Erde ohne Begrenzung durch Überspannungsableiter erwartet werden. Die Werte in Bild 1 beruhen auf Ergebnissen und Studien und enthalten die Auswirkungen der meisten Faktoren, welche die Überspannungen bestimmen.

Bild 1 sollte als Aussage dafür verwendet werden, ob die Überspannungen für eine gegebene Situation problematisch sind oder nicht. Wenn ja, gibt der Wertebereich an, bis zu welchem Ausmaß die Überspannungen begrenzt werden können. Zu diesem Zweck sind eingehende Untersuchungen erforderlich.

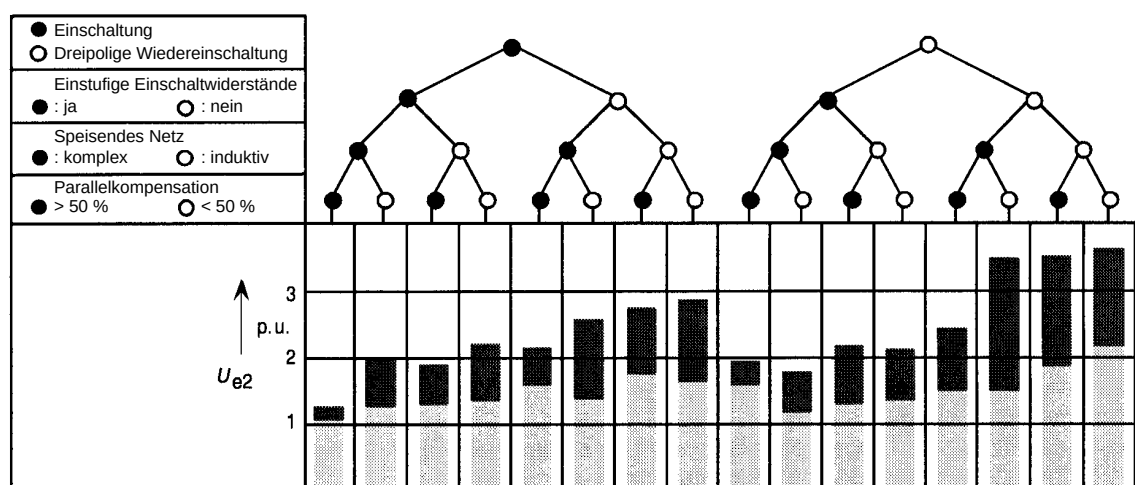


Bild 1: Bereiche der 2 %-Werte langsam ansteigender Überspannungen am Leitungsende beim Einschalten und Wiedereinschalten der Leitung

2.3.3.1.2 Überspannungen Leiter – Leiter

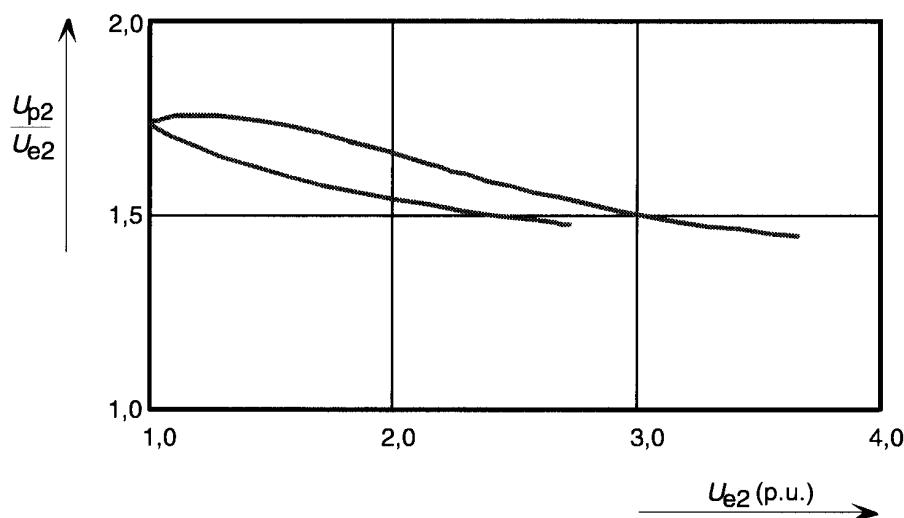
Bei der Bewertung von Leiter-Leiter-Überspannungen muß ein weiterer Parameter hinzugefügt werden. Da die Isolierung auf die Unterteilung einer gegebenen Überspannung Leiter gegen Leiter in zwei Leiter-Erde-Komponenten empfindlich reagiert, muß für die Auswahl eines spezifischen Zeitpunktes die Isolationscharakteristik berücksichtigt werden. Es wurden zwei Zeitpunkte ausgewählt [1].

a) Zeitpunkt des Leiter-Leiter-Überspannungsscheitelwertes: Dieser Zeitpunkt ergibt den höchsten Überspannungswert Leiter gegen Leiter. Er stellt die höchste Beanspruchung für alle Isolieranordnungen dar, für welche die dielektrische Festigkeit zwischen Leitern gegenüber einer Aufteilung in Komponenten unempfindlich ist. Typische Beispiele sind die Isolierung zwischen Wicklungen oder kurze Luftstrecken.

b) Leiter-Leiter-Überspannung zum Zeitpunkt des Leiter-Erde-Überspannungsscheitelwertes: Obwohl dieser Zeitpunkt niedrigere Überspannungswerte ergibt als der Zeitpunkt des Scheitelwertes der Überspannung Leiter gegen Leiter, kann er für solche Isolieranordnungen, bei denen die dielektrische Festigkeit zwischen Leitern durch Unterteilung in Komponenten beeinflusst wird, schwerwiegender sein. Typische Beispiele sind große Luftstrecken – für diese ist der Zeitpunkt des positiven Leiter-Erde-Scheitelwertes am schwerwiegendsten – oder GIS (dreipolig, gekapselt) – für diese ist der negative Scheitelwert der schwerwiegendste.

Die statistischen Charakteristiken der Überspannungen Leiter gegen Leiter sowie die Relationen zwischen den Werten, die zu den beiden Zeitpunkten gehören, sind in [Anhang D](#) beschrieben. Es wurde beschlossen, daß für alle Isolierungsarten, außer für Luftstrecken im Bereich II, die repräsentative Überspannung zwischen Leitern gleich dem Scheitelwert der Leiter-Leiter-Überspannung ist. Für Luftstrecken im Bereich II sowie insbesondere für Netzspannungen gleich oder größer 500 kV sollte die repräsentative Überspannung Leiter gegen Leiter aus den Überspannungsscheitelwerten der Leiter-Erde- und Leiter-Leiter-Überspannung ermittelt werden, so wie in [Anhang D](#) beschrieben.

Der 2 %-Wert der Überspannung Leiter gegen Leiter kann näherungsweise aus der Überspannung Leiter gegen Erde ermittelt werden. Bild 2 zeigt den Bereich der möglichen Verhältnisse zwischen den 2 %-Werten Leiter gegen Leiter und Leiter gegen Erde. Der obere Grenzwert dieses Bereiches gilt für Überspannungen bei schnellem dreipoligen Wiedereinschalten, der untere Grenzwert gilt für Überspannungen bei dreipoligem Einschalten.



ANMERKUNG: Der obere Teil des dargestellten Bereiches darf auf dreipoliges Wiedereinschalten und der untere Teil auf Einschalten angewendet werden.

Bild 2: Verhältnis zwischen den 2 %-Werten von langsam ansteigenden Leiter-Leiter- und Leiter-Erde-Überspannungen

2.3.3.1.3 Längsüberspannungen

Längsüberspannungen zwischen den Anschlüssen während des Einschaltens oder Wiedereinschaltens bestehen aus der Dauerbetriebsspannung an der einen Anschlußklemme und der Schaltüberspannung an der anderen Anschlußklemme. In synchronisierten Netzen haben der Scheitelwert der höchsten Schaltüberspannung und die Betriebsspannung die gleiche Polarität, und die Längsisolierung hat eine geringere Überspannung auszuhalten als die Isolierung Leiter gegen Erde.

Die Längsisolierung zwischen nichtsynchrone Netzen kann an dem einen Anschluß Einschalt-Überspannungen und an dem anderen Anschlußpunkt dem Scheitelwert der bestimmungsgemäßen Betriebsspannung mit entgegengesetzter Polarität ausgesetzt sein.

Für die langsam ansteigende Überspannungskomponente gelten die gleichen Prinzipien wie für die Isolierungen Leiter gegen Erde.

2.3.3.1.4 Angenommene höchste Überspannungen

Wenn kein Schutz durch Überspannungsableiter vorgesehen ist, ist die angenommene höchste Einschalt- oder Wiedereinschalt-Überspannung folgende:

- für die Leiter-Erde-Überspannung: der Abbruchwert U_{et} ;
- für die Leiter-Leiter-Überspannung: der Abbruchwert U_{pt} oder (für die äußere Isolierung im Bereich II) der nach [Anhang D](#) bestimmte Wert, wobei beide in zwei gleiche Komponenten entgegengesetzter Polarität unterteilt sind;
- für die Längsüberspannung: der Abbruchwert U_{et} der Leiter-Erde-Überspannung – durch das Einschalten bedingt – an der einen Anschlußklemme und der Scheitelwert mit entgegengesetzter Polarität der bestimmungsgemäßen Betriebsspannung an der anderen Anschlußklemme.

Diese Definition der maximalen Längsüberspannung setzt voraus, daß die Betriebsfrequenzen an beiden Anschlüssen synchronisiert sind (über einen parallelen Pfad), so daß die durch Wiedereinschaltung bedingten Längsüberspannungen nicht gesondert betrachtet werden müssen (weil der Einfluß durch liegengebliebene Ladungen durch diese Annahme berücksichtigt wird).

2.3.3.2 Überspannungen bei Fehlereintritt und Fehlerabschaltung

Langsam ansteigende Überspannungen werden einerseits erzeugt bei Fehlereintritt und Fehlerabschaltung durch die Spannungsänderung von Betriebsspannung zu zeitweiliger Überspannung an den fehlerfreien Leitern, andererseits durch Spannungsänderung am fehlerbehafteten Leiter von einem Wert nahe Null zurück zur Betriebsspannung. Beide Ursachen bewirken nur Überspannungen Leiter gegen Erde; Überspannungen zwischen Leitern können vernachlässigt werden. Nachstehend sind vorsichtige Schätzungen für den angenommenen Höchstwert der repräsentativen Überspannung U_{et} gegeben.

- Fehlereintritt: $U_{et} = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}}(2k - 1)U_s$ (kV Scheitelwert)
- Fehlerabschaltung: $U_{et} = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \cdot 2,0 U_s$ (kV Scheitelwert)

Dabei ist k der Erdfehlerfaktor.

Im Bereich I müssen durch Erdfehler verursachte Überspannungen berücksichtigt werden, wenn es sich um Netze handelt, in denen Transformatoren mit isoliertem Sternpunkt oder mit Erdschlußkompensationen angewandt werden. Dabei ist der Erdfehlerfaktor annähernd $\sqrt{3}$. Für diese Netze kann die Isolationskoordination auf der angenommenen maximalen Überspannung beruhen, und die Wahrscheinlichkeit ihrer Amplituden braucht nicht beachtet zu werden.

Im Bereich II, wo die durch Einschalten oder Wiedereinschalten bedingten Überspannungen auf Werte unter 2 p.u. begrenzt werden, erfordern durch Fehlereintritt und Fehlerabschaltung bedingte Überspannungen eine sorgfältige Untersuchung, sofern sie nicht auf dieses Niveau begrenzt werden.

2.3.3.3 Überspannungen infolge Lastabwurf

Langsam ansteigende Überspannungen infolge Lastabwurf sind nur in Netzen des Bereichs II von Bedeutung, in denen die durch Einschalten oder Wiedereinschalten bedingten Überspannungen auf Werte unter 2 p.u. begrenzt werden. In diesen Fällen müssen sie untersucht werden, insbesondere wenn Blocktransformatoren oder lange Übertragungsleitungen mit betroffen sind.

2.3.3.4 Überspannungen bei Schalten von induktiven und kapazitiven Strömen

Durch Schalten von induktiven und kapazitiven Strömen entstehen Überspannungen, die Beachtung erfordern können. Insbesondere sollten folgende Schaltvorgänge berücksichtigt werden:

- Unterbrechung von Motor-Anlaufströmen;
- Unterbrechung von induktiven Strömen, z. B. Unterbrechen des Magnetisierungsstromes eines Transformators oder Abschalten einer Nebenschlußdrossel [6];
- Schalten und Betrieb von Lichtbogenöfen einschließlich ihrer Transformatoren, wenn es zum Stromabriß kommen kann;
- Schalten von unbelasteten Kabeln und Kondensatorbänken;
- Unterbrechung von Strömen durch Hochspannungssicherungen.

Beim Unterbrechen von kapazitiven Strömen (Abschaltung von unbelasteten Leitungen, Kabeln oder Kondensatorbänken) können durch Rückzündung von Leistungsschaltern besonders gefährliche Überspannungen entstehen; die Verwendung rückzündungsfreier Leistungsschalter ist notwendig. Beim Einschalten von Kondensatorbänken, insbesondere bei nicht geerdeten Bänken, sollte darauf geachtet werden, daß die Überspannungen Leiter gegen Leiter in Betracht gezogen werden (siehe auch 2.3.4.3).

2.3.3.5 *Langsam ansteigende Blitzüberspannungen*

In Netzen mit langen Leitungen (länger als 100 km) entstehen langsam ansteigende Blitzüberspannungen bedingt durch ferne Blitzeinschläge in den Leiter und wenn der Blitzstrom so gering ist, daß er keinen Überschlag der Längsisolation verursacht, ferner wenn der Blitzeinschlag in einer ausreichenden Entfernung von der betrachteten Stelle erfolgt, damit ein langsamer Anstieg entstehen kann.

Da Blitzströme Halbwertzeiten aufweisen, die nur selten 200 µs überschreiten, treten keine Überspannungen mit hohen Amplituden und Anstiegszeiten auf, die für die Isolierung kritisch sind. Langsam ansteigende Blitzüberspannungen sind deshalb für die Isolationskoordination von untergeordneter Bedeutung und werden üblicherweise vernachlässigt.

2.3.3.6 *Begrenzung von langsam ansteigenden Überspannungen*

Üblicherweise werden zur Begrenzung von langsam ansteigenden Überspannungen auf Leitungen Leistungsschalter mit Einschaltwiderständen eingesetzt. Andere Hilfsmittel, wie gesteuertes Zuschalten und Varistoren über Löschkammern, können auch zur Begrenzung von Überspannungen verwendet werden, die durch Einschalten der Leitung sowie durch Schalten von induktiven und kapazitiven Lasten bedingt sind.

Induktive Spannungswandler an den Leitungsenden reduzieren wirksam die nach dem Ausschalten auf den Leitern der Leitung verbliebenen Restladungen. Langsam ansteigende Überspannungen infolge dreipoliger Wiedereinschaltung werden damit auf den Wert bei Leitungseinschalten begrenzt.

2.3.3.7 *Schutz gegen langsam ansteigende Überspannungen mit Überspannungsableitern*

In Netzen mit mäßigen zeitweiligen Überspannungen sind Metalloxid-Überspannungsableiter ohne Funkenstrecken sowie speziell konstruierte Überspannungsableiter mit Funkenstrecken als Schutz gegen langsam ansteigende Überspannungen geeignet. Dagegen sprechen Funkenstreckenableiter mit nichtlinearem Widerstand infolge des Ansprechverhaltens der in Reihe liegenden Funkenstrecken bei langsam ansteigenden Überspannungen nur in Extremfällen an. Es ist zu beachten, daß die Überspannungen in der Mitte der Leitung wesentlich höher sein können als an den Leitungsenden, wenn die Überspannungsableiter zur Begrenzung langsam ansteigender Überspannungen an den Enden langer Übertragungsleitungen installiert sind.

Als allgemeine Regel kann angenommen werden, daß Metalloxid-Überspannungsableiter die Leiter-Erde-Überspannungsamplituden (kV Spitzenwert) auf etwa das Zweifache der Überspannungsableiter-Bemessungsspannung (kV Effektivwert) begrenzen. Das bedeutet, daß Metalloxid-Überspannungsableiter zur Begrenzung von langsam ansteigenden Überspannungen geeignet sind, die durch Einschalten und Wiedereinschalten der Leitung sowie durch Schalten von induktiven und kapazitiven Strömen verursacht werden. Im allgemeinen gilt das nicht bei der Begrenzung von Überspannungen, die durch Erdfehler und Fehlerabschaltungen verursacht wurden, da die zu erwartenden Amplituden bei letzteren zu klein sind (eine Ausnahme darf bei Fehlern gemacht werden, die an reihenkompensierten Leitungen auftreten).

Überspannungen, die durch Einschalten und Wiedereinschalten von Leitungen verursacht werden, bewirken Ströme durch die Überspannungsableiter, die kleiner als etwa 0,5 kA bis 2 kA sind. In diesem Strombereich ist die Kenntnis der genauen Stromamplitude infolge der extremen Nichtlinearität des Metalloxidmaterials nicht so wichtig. Die leichte Abhängigkeit von den Strom-Anstiegszeiten, die die Metalloxid-Überspannungsableiter aufweisen, ist für langsam ansteigende Überspannungen vernachlässigbar und kann unberücksichtigt bleiben. Darüber hinaus brauchen Auftrennungen in Stationen nicht berücksichtigt zu werden. Fernab gelegene Freileitungsisolierungen können jedoch durch Überspannungen beansprucht werden, die wesentlich höher als der Schutzpegel sind.

Überspannungsableiter werden gewöhnlich zwischen Leiter und Erde installiert. Dabei muß darauf geachtet werden, daß die Überspannungen Leiter gegen Leiter etwa das Zweifache des Leiter-Erde-Schutzpegels des Überspannungsableiters erreichen können, wenn Metalloxid-Überspannungsableiter zur Begrenzung von langsam ansteigenden Überspannungen auf einem Niveau verwendet werden, das kleiner als 70 % des 2 %-Wertes der unbeeinflussten Leiter-Erde-Überspannung ist: Die Überspannung Leiter gegen Leiter wird dann aus zwei Leiter-Erde-Komponenten bestehen, wobei das häufigste Verhältnis 1:1 ist [7]. Siehe auch 3.3.3.1.

Der angenommene Höchstwert der repräsentativen Leiter-Erde-Überspannung ist gleich dem Schutzpegel des Überspannungsableiters: $U_{tp} = U_{ps}$.

Die Überspannungen Leiter gegen Leiter betragen das Zweifache des Schutzpegels oder des Abbruchwertes der in Anhang D bestimmten Leiter-Leiter-Überspannungen, je nachdem, welcher Wert kleiner ist. Wenn niedrigere Überspannungen Leiter gegen Leiter erforderlich sind, müssen zusätzliche Überspannungsableiter zwischen Leitern installiert werden.

In allen Fällen sollten beim Einsatz von Überspannungsableitern zur Begrenzung von langsam ansteigenden Überspannungen die erforderliche Stromflußdauer und die Anforderungen an die Energieableitung berücksichtigt werden, wenn die angemessene Klasse für den Überspannungsableiter ausgewählt wird. Üblicherweise werden zur Begrenzung von langsam ansteigenden Schaltüberspannungen auf Leitungen Leistungsschalter mit Einschaltwiderständen eingesetzt.

2.3.4 Schnell ansteigende Überspannungen

2.3.4.1 Blitzüberspannungen auf Freileitungen

Blitzüberspannungen werden durch direkte Blitzeinschläge in die Leiter oder durch rückwärtige Überschläge verursacht. Sie werden auch durch Blitzeinschläge in die Erde nahe der Leitung induziert. Induzierte Blitzstoßspannungen verursachen im allgemeinen Überspannungen unter 400 kV auf der Freileitung und sind deshalb nur für Netze im unteren Netzspannungsbereich von Bedeutung. Im Bereich II sind infolge des hohen Isoliervermögens rückwärtige Überschläge weniger wahrscheinlich als im Bereich I. Sie sind in Netzen mit 500 kV und darüber selten.

Die repräsentative Form der Blitzüberspannung ist die genormte Blitzstoßspannung ($1,2/50 \mu s$). Der repräsentative Scheitelwert ist entweder als angenommener Höchstwert gegeben, oder er wird durch eine Wahrscheinlichkeitsverteilung von Scheitelwerten dargestellt, die gewöhnlich den von der Überspannungs-Ereignisrate abhängigen Scheitelwert angibt.

2.3.4.2 Blitzüberspannungen in Schaltanlagen

Blitzüberspannungen in Umspannstationen sowie die Häufigkeit ihres Auftretens sind abhängig von:

- dem Blitzverhalten der Freileitungen, die mit den Umspannstationen verbunden sind;
- der Größe und Auslegung der Umspannstationen, insbesondere von der Anzahl der angeschlossenen Leitungen;
- dem Momentanwert der Betriebsspannung (zum Zeitpunkt des Blitzeinschlages).

Die Gefährlichkeit von Blitzüberspannungen für Betriebsmittel der Umspannstation wird aus der Kombination dieser drei Faktoren bestimmt. Es sind mehrere Schritte erforderlich, um einen angemessenen Schutz sicherzustellen. Die Überspannungsamplituden (ohne Begrenzung durch Überspannungsableiter) sind gewöhnlich zu hoch, als daß die Isolationskoordination auf diesen Werten begründet sein könnte. In manchen Fällen, besonders bei Umspannstationen mit Kabelanschluß, können jedoch die Scheitelwerte der Blitzüberspannungen durch den Selbstschutz, der durch den niedrigen Wellenwiderstand der Kabel besteht, auf annehmbar niedrige Werte reduziert werden (siehe [Anhang F](#)).

Für die Längsisolierung sowie für die Isolierung Leiter gegen Leiter muß der Momentanwert der betriebsfrequenten Spannung an den gegenüberliegenden Anschlüssen berücksichtigt werden. Für die Isolierung Leiter gegen Leiter kann angenommen werden, daß sich die Auswirkungen der betriebsfrequenten Spannung und die Kopplung zwischen den Leitern der Freileitung aufheben, so daß die gegenüberliegende Klemme als geerdet angesehen werden kann. Für die Längsisolierung gibt es jedoch keine solchen aufhebenden Wirkungen, so daß die betriebsfrequente Spannung berücksichtigt werden muß.

2.3.4.2.1 Direkteinschläge

Schirmfehler treten regellos zu irgendeinem Zeitpunkt der betriebsfrequenten Halbwellen auf. Der Einfluß der Betriebswechselspannung an der gegenüberliegenden Klemme einer Längsisolierung ist zu berücksichtigen durch:

- Berechnung der Blitzüberspannungs-Ereignisrate für verschiedene Momentanwerte der Betriebsspannung;
- Ermittlung der Isolations-Fehlerwahrscheinlichkeit für verschiedene Unterteilungen in Komponenten; üblicherweise ist die Summe der beiden Komponenten der entscheidende Parameter;
- Bestimmung der Isolations-Fehlerrate in Abhängigkeit von der Summe der Blitzüberspannung und dem gleichzeitigen Wert der betriebsfrequenten Wechselspannung;
- Anwendung des Auswahlkriteriums auf diese erwartete Fehlerrate, um die erforderliche Summe der beiden Komponenten zu erhalten.

Wenn diese Summe in eine Blitzstoßspannungskomponente (gleich der repräsentativen Leiter-Erde-Blitzüberspannung) und eine betriebsfrequente Komponente aufgeteilt wird, dann wird die betriebsfrequente Spannungskomponente kleiner sein als der Scheitelwert der Betriebsspannung Leiter gegen Erde. Es wurde ermittelt, daß ein Faktor von 0,7 als angemessen angesehen werden kann. Das bedeutet bei Schirmfehlern, daß die repräsentative Längsüberspannung aus der repräsentativen Blitzüberspannung gegen Erde an dem einen Anschluß und dem 0,7fachen Scheitelwert der Leiter-Erde-Betriebsspannung mit entgegengesetzter Polarität an dem anderen Anschluß zusammengesetzt sein sollte.

2.3.4.2.2 Rückwärtige Überschläge

Rückwärtige Überschläge treten am wahrscheinlichsten an dem Leiter auf, der den momentan höchsten Wert der betriebsfrequenten Spannung entgegengesetzter Polarität aufweist. Das bedeutet für Umspannstationen, daß die repräsentative Längs-Blitzüberspannung gleich der Summe der repräsentativen Blitzüberspannung gegen Erde an dem einen Anschluß und dem Scheitelwert der Betriebsspannung an dem anderen Anschluß sein sollte (entgegengesetzte Polarität).

2.3.4.3 Überspannungen bei Schaltvorgängen und Fehlern

Schnell ansteigende Schaltüberspannungen treten hauptsächlich in Stationen auf, wenn Betriebsmittel über kurze Verbindungen dem Netz zu- oder abgeschaltet werden. Schnell ansteigende Schaltüberspannungen können auch bei Überschlägen an der äußeren Isolierung auftreten. Solche Ereignisse können besonders schwere Beanspruchungen an nahe gelegenen Innenisolierungen (wie z. B. Wicklungen) verursachen.

Für die Isolationskoordination entspricht die repräsentative Überspannungsform, obwohl sie im allgemeinen eine schwingende Form aufweist, der genormten Blitzstoßspannung [1,2/50 µs]. Betriebsmittel mit Wicklungen sollten jedoch infolge der starken Beanspruchungen zwischen Windungen besonders sorgfältig berücksichtigt werden.

Die maximalen Überspannungsscheitelwerte sind von der Art und dem Verhalten der Schaltgeräte abhängig. Da die Überspannungsscheitelwerte gewöhnlich kleiner sind als jene, die durch Blitze verursacht werden, ist deren Bedeutung auf Sonderfälle beschränkt. Es ist deshalb technisch begründet, den Scheitelwert der repräsentativen Überspannung durch folgende Höchstwerte zu charakterisieren (als p.u. bezogen auf $\sqrt{2} U_s/\sqrt{3}$):

- Schalten des Leistungsschalters ohne Rückzündung: 2 p.u.;
- Schalten des Leistungsschalters mit Rückzündung: 3 p.u.

ANMERKUNG: Beim Schalten von induktiven Lasten tendieren manche Mittelspannungs-Leistungsschalterttypen zu Mehrfachunterbrechungen des Einschwingstroms, woraus sich Überspannungen bis 6 p.u. ergeben, wenn keine entsprechenden Schutzmaßnahmen vorgesehen werden.

- Schalten des Trennschalters: 3 p.u.

Da das gleichzeitige Auftreten schnell ansteigender Schaltüberspannungen an mehr als einem Leiter höchst unwahrscheinlich ist, gibt es keine höheren Überspannungen Leiter gegen Leiter als die Überspannung Leiter gegen Erde. Für die letztere können die vorher definierten maximalen Werte verwendet werden, um die Bedeutung solcher Überspannungen zu überprüfen. Wenn diese die Steh-Blitzstoßspannung der Isolierung bestimmen, sind eingehendere Untersuchungen zu empfehlen.

2.3.4.4 Begrenzung des Auftretens schnell ansteigender Überspannungen

Das Auftreten von Blitzüberspannungen kann durch geeignete Konstruktion der Freileitungen begrenzt werden. Mögliche konstruktive Maßnahmen für die Begrenzung des Auftretens von Blitzüberspannungen sind:

- für direkte Blitzeinschläge in Leiter: angemessene Auslegung der Erdseilschirmung;
- für rückwärtige Überschläge: Reduzierung der Masterdungsimpedanz oder Erhöhung des Isoliervermögens.

In manchen Fällen wurde mit geerdeten Traversen oder Funkenstrecken in der Nähe von Schaltanlagen der Versuch gemacht, einlaufende Blitzüberspannungen zu begrenzen. Solche Maßnahmen führen jedoch zu einem Ansteigen der Überschlagswahrscheinlichkeit in der Nähe von Umspannstationen mit der Folge, daß schnell ansteigende Überspannungen entstehen. Außerdem sollte in der Nähe von Umspannstationen dem Erdseilschutz und der Masterdung besondere Aufmerksamkeit gewidmet werden, um die Wahrscheinlichkeit von rückwärtigen Überschlägen an dieser Stelle zu senken.

Die Höhe schnell ansteigender Überspannungen, die durch Schaltvorgänge verursacht werden, kann durch die Auswahl geeigneter Schaltgeräte begrenzt werden (rückzündungsarme Leistungsschalter, Unterbrechungsschalter bei kleinen Strömen, Verwendung von Einschalt- oder Ausschalt-Widerständen, gesteuertes Schalten usw.).

2.3.4.5 Schutz gegen schnell ansteigende Überspannungen mit Überspannungsableitern

Der Schutz, der durch Überspannungsableiter gegen schnell ansteigende Überspannungen geboten wird, ist abhängig von:

- der Amplitude und Form der Überspannung;
- der Schutzcharakteristik des Überspannungsableiters;
- der Amplitude und Form des durch den Überspannungsableiter fließenden Stromes;
- der Stoßimpedanz und/oder Kapazität des geschützten Betriebsmittels;
- der Entfernung zwischen Überspannungsableiter und dem geschützten Betriebsmittel, einschließlich der Erdverbindungen (siehe Bild 3);
- der Anzahl und dem Wellenwiderstand der angeschlossenen Leitungen.

Zum Schutz gegen Blitzüberspannungen werden im allgemeinen Überspannungsableiter mit folgenden Nenn-Ableitstoßströmen eingesetzt:

- für Netze mit U_m im Bereich I: 5 kA oder 10 kA;
- für Netze mit U_m im Bereich II: 10 kA oder 20 kA.

Wenn zu erwarten ist, daß die durch den Überspannungsableiter fließenden Ströme größer als dessen Nenn-Ableitstoßstrom sind, muß nachgewiesen werden, daß die entsprechenden Restspannungen noch eine geeignete Überspannungsbegrenzung darstellen.

Für die Bestimmung der (durch Blitzschlag bedingten) Energieaufnahme der in Umspannstationen installierten Überspannungsableiter ist gewöhnlich die Annahme ausreichend, daß die repräsentative Amplitude der in der Station ankommenden unbeeinflussten Blitzüberspannung gleich der negativen 50 %-Steh-Blitzstoßspannung der Freileitung ist. Für die absolute Energieaufnahme sollte man jedoch die Möglichkeit in Betracht ziehen, daß ein Blitz aus mehreren Einschlägen bestehen kann.

Die Schutzcharakteristik eines Überspannungsableiters ist nur an seinem Standort gültig. Die resultierende Überspannungsbegrenzung am Standort des Betriebsmittels sollte deshalb die Entfernung zwischen den beiden Standorten berücksichtigen. Je größer die Standort-Entfernung zwischen Überspannungsableiter und geschütztem Betriebsmittel ist, um so geringer ist die Schutzwirkung für dieses Betriebsmittel. Tatsächlich steigt mit zunehmender Entfernung die auf das Betriebsmittel einwirkende Überspannung über den Schutzpegel des Überspannungsableiters. Außerdem muß für die Bewertung der wirksamen Überspannungsbegrenzung diese Länge zu der Länge der Anschlußleitungen addiert werden, wenn bei der Bestimmung der Überspannungsableiter-Schutzcharakteristik der Einfluß der Länge des Überspannungsableiters vernachlässigt wurde. Für Metalloxid-Überspannungsableiter ohne Funkenstrecken darf die Reaktionszeit des Materials selbst unberücksichtigt bleiben. Die Länge des Überspannungsableiters kann zu Längen der Anschlußleitungen addiert werden.

Für die vereinfachte Bestimmung der repräsentativen Überspannung am zu schützenden Objekt kann Gleichung (1) angewendet werden. Für den Schutz von Transformatoren sollte Gleichung (1) mit Vorsicht benutzt werden, da Kapazitäten von mehr als einigen hundert Picofarad höhere Überspannungen verursachen können.

$$U_{rp} = U_{pl} + 2 ST \quad \text{für } U_{pl} \geq 2 ST \quad (1)$$

$$U_{rp} = 2 U_{pl} \quad \text{für } U_{pl} < 2 ST \quad (2)$$

Dabei ist:

U_{pl} Blitzstoßschutzpegel des Überspannungsableiters [kV];

S Steilheit der einlaufenden Blitzüberspannung [kV/µs];

T Laufzeit der Blitzüberspannung, die wie folgt bestimmt wird:

$$T = \frac{L}{c} \quad (3)$$

Dabei ist:

c Lichtgeschwindigkeit [300 m/µs];

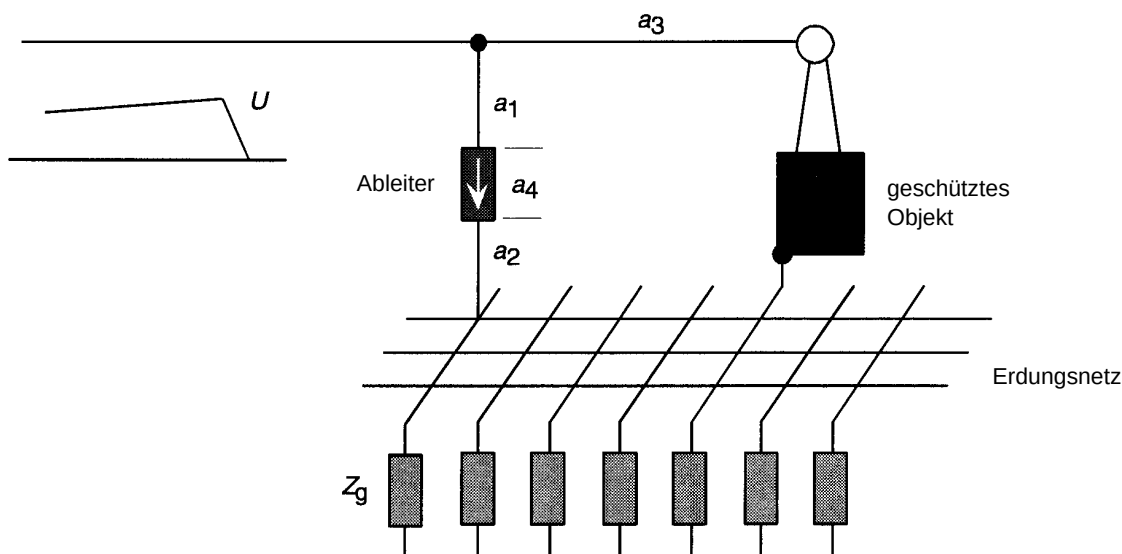
$L = a_1 + a_2 + a_3 + a_4$ Abstände aus Bild 3 [m].

Die Werte für die Steilheit müssen entsprechend dem Blitzverhalten der an die Station angeschlossenen Freileitungen und der angenommenen Fehlerwahrscheinlichkeit in der Umspannstation gewählt werden. Eine umfassende Abhandlung ist in [Anhang F](#) enthalten.

Die Wahrscheinlichkeitsverteilung der repräsentativen Blitzüberspannungsamplitude an der Umspannstation kann durch Berechnungen der transienten Überspannung ermittelt werden, wobei das Blitzverhalten der Übertragungsleitungen, das Wanderwellenverhalten von Freileitungen und Umspannstationen sowie das Verhalten der Betriebsmittelisolierung und der Überspannungsableiter in Abhängigkeit vom Scheitelwert und der Form der Überspannung zu berücksichtigen ist. Hinweise werden im [Anhang F](#) gegeben.

Als allgemeine Empfehlung gilt, daß bei der Bestimmung der repräsentativen Scheitelwerte die Abhängigkeit des Isoliervermögens von der Form der Überspannung ebenfalls berücksichtigt werden sollte. Das gilt insbesondere für äußere Isolierungen und Öl-Papier-Isolierungen, bei denen die Spannungs-Zeit-Charakteristik zu repräsentativen Scheitelwerten führen kann, die wesentlich kleiner sind als die Überspannungsscheitelwerte. Für GIS oder für feste Isolierungen ist diese Differenz vernachlässigbar, und der Scheitelwert der repräsentativen Überspannung ist gleich dem Überspannungsscheitelwert.

Im [Anhang F](#) ist ein vereinfachtes Verfahren zur Einschätzung der repräsentativen Wahrscheinlichkeitsverteilung der Blitzüberspannungsamplituden gegeben. Der angenommene Höchstwert der repräsentativen Blitzüberspannungsamplitude ist entweder der Abbruchwert der Wahrscheinlichkeitsverteilung oder ein Wert, der aus Erfahrungen mit vorhandenen Netzen gewonnen wurde. Verfahren zur Einschätzung dieser Werte sind ebenfalls im [Anhang F](#) enthalten.



- a_1 : Länge der Verbindungsleitung, die den Überspannungsableiter mit der Leitung verbindet
- a_2 : Länge der Verbindungsleitung, die den Überspannungsableiter mit der Erde verbindet
- a_3 : Länge des Leiters zwischen Überspannungsableiter und dem Schutzobjekt
- a_4 : Länge des Aktivteils eines Überspannungsableiters
- Z_g : Erdungsimpedanz
- U : einlaufende Überspannungswelle

Bild 3: Schema für den Anschluß des Überspannungsableiters an das Schutzobjekt

2.3.5 Sehr schnell ansteigende Überspannungen

Sehr schnell ansteigende Überspannungen haben ihre Ursache in Trennschalterbetätigungen oder Fehlern in gasisolierten Stationen (GIS). Sie entstehen infolge des schnellen Durchschlags der Gasstrecke und der nahezu ungedämpften Spannungsausbreitung innerhalb der GIS. Ihre Amplituden werden beim Verlassen der GIS stark gedämpft, z. B. an einer Durchführung, und ihre Anstiegszeiten werden gewöhnlich bis zu einer Größenordnung anwachsen, die „schnell ansteigende Überspannungen“ einnehmen. Sehr schnell ansteigende Überspannungen können auch bei Mittelspannungs-Trockentransformatoren mit kurzen Verbindungen zu Schaltanlagen und/oder Schaltgeräten auftreten.

Die Form der Überspannung ist charakterisiert durch einen schnellen Anstieg der Spannung bis zu ihrem Scheitelwert mit einer Anstiegszeit unter $0,1 \mu s$. Bei Trennschalterbetätigungen folgt diesem Anstieg typischerweise eine Schwingung mit Frequenzen über 1 MHz. Die Dauer der sehr schnell ansteigenden Überspannungen beträgt weniger als 3 ms, aber sie kann mehrere Male auftreten. Die Überspannungsamplitude ist von der Trennschalterkonstruktion und von der Stationsanordnung abhängig. Man kann davon ausgehen, daß eine Begrenzung der größten Amplituden auf 2,5 p.u. erreichbar ist. Die Überspannungen können jedoch in direkt angeschlossenen Transformatoren hohe lokale Überspannungen erzeugen.

Durch Fehler innerhalb einer GIS werden die angeschlossenen Betriebsmittel (z. B. Transformatoren) durch Überspannungen beansprucht. Die Form und die Amplitude der Überspannung ist von der Art des Betriebsmittelan Anschlusses an die gasisolierte Station sowie von der Lage der Fehlerstelle innerhalb der GIS abhängig. Die Überspannungen haben Amplituden bis zum 1,6fachen der Durchschlagsspannungen und können innerhalb der Station Frequenzen bis zu 20 MHz annehmen.

An den Anschlußklemmen von Betriebsmitteln, die über eine kurze Hochspannungsfreileitung mit der GIS verbunden sind, weisen die Überspannungsschwingungen Frequenzen im Bereich von 0,2 MHz bis 2,0 MHz sowie Amplituden bis zum 1,5fachen der Überschlagnspannung auf. In diesem Fall wird es möglich sein, das Betriebsmittel durch Überspannungsableiter zu schützen. Jedoch kann der Frequenzgehalt der Überspannungen durch Resonanzen an Teilwindungen hohe interne Beanspruchungen der Transformatorwicklungen ergeben. Es könnten andere Schutzverfahren, die durch eingehende Untersuchungen bestätigt werden, erforderlich sein. Die Maßnahmen beinhalten eine Änderung (Absenkung) der Frequenz durch Einbau zusätzlicher Kapazitäten. Vorsicht ist jedoch bei dieser Vorgehensweise angebracht, um die Transformator-Resonanzcharakteristik akkurat zu erfassen.

Die repräsentative Überspannung kann nicht festgelegt werden, da zur Zeit keine geeigneten Normen zur Verfügung stehen. Es wird jedoch erwartet, daß sehr schnell ansteigende Überspannungen keinen Einfluß auf die Auswahl von Bemessungsstehspannungen haben werden.

3 Koordinationssstehspannung

3.1 Eigenschaften der Isolationsfestigkeit

In allen Werkstoffen wird die Leitfähigkeit durch die Beweglichkeit von geladenen Teilchen bewirkt. Leiter enthalten eine große Anzahl freier Elektronen, die sich in einem vorhandenen elektrischen Feld bewegen, während Isolierstoffe sehr wenig freie Elektronen haben. Wenn die elektrische Beanspruchung in einem Isolierstoff auf ein ausreichend hohes Niveau gesteigert wird, so wird sich der Widerstand entlang eines Pfades im Isolierstoff von einem hohen Wert zu einem Wert verändern, der mit denen von Leitern vergleichbar ist. Diese Änderung wird als Durchschlag bezeichnet.

Ein Durchschlag erfolgt in drei wesentlichen Stufen:

- Einsetzen der Ionisierung an einem Punkt oder an mehreren Punkten;
- Entstehung eines ionisierten Kanals durch die Strecke;
- Überbrückung der Strecke und Übergang zur vollständigen Entladung.

Die dielektrische Festigkeit wird durch eine Anzahl von Faktoren beeinflusst:

- Betrag, Form, Dauer und Polarität der angelegten Spannung;
- dielektrische Feldverteilung in der Isolierung: Homogenität oder Inhomogenität des elektrischen Feldes, Elektroden in der Nähe der betrachteten Isolierstrecke und deren Potential;
- Art der Isolierung: gasförmig, flüssig, fest oder eine Kombination derselben; Verunreinigungen und vorhandene lokale Inhomogenitäten;
- physikalischer Zustand der Isolierung: Temperatur, Druck sowie weitere Umgebungsbedingungen, mechanische Beanspruchungen usw.; die Vorgeschichte der Isolierung kann ebenfalls von Bedeutung sein;
- Verformung der Isolierung unter mechanischer Beanspruchung, chemischen Einflüssen, Oberflächeneinflüssen an Leitern usw.

Der Durchschlag in Luft ist weitgehend von der Elektrodenanordnung, der Polarität und der Wellenform der einwirkenden Spannungsbeanspruchung abhängig. Außerdem beeinflussen die relativen atmosphärischen Verhältnisse die Durchschlagfestigkeit – unabhängig von Form und Polarität der einwirkenden Beanspruchung. Aus Labormessungen gewonnene Durchschlagfestigkeiten in Luft sind auf genormte atmosphärische Bedingungen bezogen, wie sie in **IEC 60-1** definiert sind, d. h.:

- Temperatur: 20 °C;
- Druck: 101,3 kPa (1 013 mbar);
- absolute Luftfeuchte: 11 g/m³.

Labormessungen können auch für nichtgenormte Bedingungen durchgeführt werden, wie z. B. niedriger Luftdruck, hohe relative Luftfeuchte, Verschmutzung, Eis und Schnee, hohe Temperaturen sowie das Vorhandensein von Verbrennungspartikeln.

Für Freiluftisolierungen sind die Einflüsse von Luftfeuchte, Regen und Oberflächenverschmutzung besonders wichtig. Die **IEC 60-1** definiert auch Prüfverfahren für äußere Isolierung bei trockenen und nassen Bedingungen. Für metallgekapselte gasisolierte Schaltanlagen spielen der Einfluß des Innendrucks und der Temperatur sowie lokale Inhomogenitäten und Verunreinigungen eine wichtige Rolle.

In flüssigen Isolierungen können Verunreinigungen durch Partikel sowie chemische und physikalische Einflüsse oder lokale Entladungen die Isolationsfestigkeit drastisch reduzieren. Wichtig ist, daß die Minderung der Isolierfähigkeit durch chemische Verschlechterung der Isolierung mit der Zeit zunehmen kann. Das gleiche gilt auch für feste Isolierungen, bei denen die elektrische Festigkeit auch durch mechanische Beanspruchung beeinträchtigt werden kann.

Der Durchschlagvorgang ist statistischer Natur, und dies sollte Berücksichtigung finden. Infolge der Regenerierungswirkung selbstheilender Isolierung kann deren statistisches Verhalten bei Beanspruchungen durch geeignete Prüfungen bestimmt werden. Deshalb wird die selbstheilende Isolierung durch die statistische Stehspannung beschrieben, die einer Steh-Wahrscheinlichkeit von 90 % entspricht. Für nichtselbstheilende Isolierung kann der statistische Charakter der Festigkeit gewöhnlich nicht durch eine Prüfung ermittelt werden, und es wird die angenommene Stehspannung angewendet, die einer Steh-Wahrscheinlichkeit von 100 % zu entsprechen scheint (siehe **IEC 71-1, 3.23**).

Besonders im Fall von Freileitungen mit freischwingenden Leiterseilen und Isolatorketten hat der Wind Einfluß auf die Isolationsbemessung. Gewöhnlich ist dieser Einfluß nur für die Auswahl von Luftstreckenlängen aufgrund betriebsfrequenter Spannungs- und Schaltstoßspannungsfestigkeiten von Bedeutung.

Die Abschnitte 3.1.1 bis 3.1.4 enthalten Informationen zu den verschiedenen Faktoren, die das Isolationsverhalten beeinflussen. Zu eingehenderen Informationen wird auf folgenden Bericht verwiesen: CIGRÉ Technische Broschüre [7].

3.1.1 Einfluß von Polarität und Überspannungsform

3.1.1.1 Einfluß der Überspannungspolarität

Bei den typischen Geometrien der Elektrodenanordnungen, die in Hochspannungsanlagen vorkommen, ist in den meisten Fällen der an Spannung liegende Leiter der Ort des höchsten Feldstärkegradienten. Wenn bei Luftisolierung die Elektrode mit dem höchsten Feldstärkegradienten positiv ist, wird die Durchschlagsspannung der Luftstrecke niedriger sein, als wenn die höher beanspruchte Elektrode negativ ist. Die Ursache dafür ist, daß die Ausbreitung der Ionisation bei positiver Beanspruchung schneller erfolgt als bei negativer Beanspruchung.

Wo beide Elektroden annähernd gleichmäßig beansprucht sind, liegen zwei Entladungsvorgänge (mit sowohl positiven als auch negativen Charakteristiken) vor. Wenn feststeht, welche Polarität für ein Isoliersystem bzw. eine Funkenstreckenordnung schwerwiegender ist, wird die Bemessung auf dieser Polarität zu begründen sein; andernfalls müssen beide Polaritäten in Betracht gezogen werden.

3.1.1.2 Einfluß der Überspannungsform

Die Durchschlagsspannung ist bei Impulsbeanspruchung im allgemeinen von der Form der Impulsspannung abhängig.

Bei langsam ansteigenden Impulsen hängt die Festigkeit der äußeren Isolierung mehr von der Stirnzeit des Impulses als von seiner Rückenzeit ab. Die Rückenzeit ist nur im Fall der Verschmutzung auf der Oberfläche der äußeren Isolierung von besonderer Bedeutung. Bei der inneren Isolierung wird angenommen, daß deren Festigkeit nur durch den Scheitelwert bestimmt wird.

Bei der äußeren Isolierung ist typisch, daß es für jede Funkenstreckenlänge eine Impulsanstiegszeit gibt, bei der die Durchschlagsspannung ein Minimum beträgt (die kritische Anstiegszeit). Gewöhnlich liegt dieses Minimum in dem Bereich der Anstiegszeiten, der für langsam ansteigende Überspannungen gilt. Je länger die Funkenstreckenlänge, um so ausgeprägter ist das Minimum. Für Luftstrecken im Bereich I ist das Minimum flach, und sein Einfluß kann vernachlässigt werden. Für die im Bereich II notwendigen Luftstrecken ist das Minimum der Durchschlagsspannung generell gleich der Durchschlagsspannung bei der genormten Anstiegszeit von 250 µs. Das bedeutet, daß die Anwendung der genormten Spannungsform 250/2 500 µs für langsam ansteigende Überspannungen zu einer reichlich bemessenen Isolierung führt. Bei manchen Netzen, bei denen langsam ansteigende Überspannungen viel längere Anstiegszeiten als die genormten haben, kann jedoch die höhere Isolationsfestigkeit bei diesen Anstiegszeiten ausgenutzt werden.

Die Durchschlagsspannung einer äußeren Isolierung nimmt bei Beanspruchung durch Blitzstoßspannung mit zunehmender Rückenzeit ab. Bei Stehspannungen wird dies vernachlässigt, und die Durchschlagsspannung wird als gleich derjenigen angenommen, die bei der genormten Blitzstoßspannung 1,2/50 µs auftritt. Es kann jedoch eine Reduzierung der Isolierung erreicht werden: z. B. in Freiluftstationen, die durch Überspannungsableiter geschützt sind, und wenn die Blitzüberspannungsform und ihr Einfluß auf die Isolationsfestigkeit in Betracht gezogen wird.

3.1.2 Leiter-Leiter- und Längsisolation

Die dielektrische Festigkeit von Leiter-Leiter- und Längsisolieranordnungen ist vom Verhältnis zwischen den beiden Spannungskomponenten an den beiden Anschlüssen abhängig. Diese Abhängigkeit ist für die äußere Isolierung im Bereich II oder in GIS sehr wichtig.

Bei äußerer Isolierung im Bereich II ist die Reaktion der Isolierung auf Schaltüberspannungen zwischen Leitern vom Wert a abhängig, der die positive und negative Komponenten der Spannungsbeanspruchung zueinander in Beziehung setzt (siehe [Anhang D](#)). Die Prüfung der erforderlichen Stehspannung sollte dementsprechend durchgeführt werden. Die in [IEC 71-1](#) genormte repräsentative Spannungsform ist eine kombinierte Überspannung, die aus zwei synchronen Komponenten entgegengesetzter Polarität besteht; die positive Komponente ist eine genormte Schaltstoßspannung, während die negative eine Stoßspannung ist, deren Anstiegszeit und Rückenhalbwertszeit nicht kürzer ist als die der positiven Komponente. Bei Isolierungen, deren Spannungsfestigkeit vom Verhältnis der beiden Komponenten beeinflusst wird, muß die reale Übergangsamplitude in die repräsentative Amplitude umgewandelt werden, wobei die Charakteristik der Isolierung zu berücksichtigen ist (siehe [2.3.3.1](#) sowie [Anhang D](#), in dem ein bestimmtes Beispiel gegeben ist).

Bei Längsisolieranordnungen sind die Spannungskomponenten durch die repräsentativen Überspannungen festgelegt (siehe [Abschnitt 2](#)).

Die Werte, die in [3.1.4](#) für die Streuung der Isolationsfestigkeit Leiter gegen Erde angegeben sind, dürfen auch für die Festigkeit der äußeren Isolierung Leiter gegen Leiter oder der Längsisolation verwendet werden, wenn die 50 %-Überschlagsspannung als Summe der an den Anschlußklemmen anliegenden Komponenten gewertet wird.

3.1.3 Einfluß von Wetterbedingungen auf die äußere Isolierung

Überschlagsspannungen bei Luftstrecken sind vom Feuchtigkeitsgehalt der Luft und vom Luftdruck abhängig. Die Isolationsfestigkeit nimmt mit der absoluten Luftfeuchte bis zu dem Punkt zu, an dem sich auf den Isolatoroberflächen Kondensation bildet. Die Isolationsfestigkeit nimmt mit abnehmendem Luftdruck ab. Die Einflüsse des Luftdrucks und der absoluten Luftfeuchte sind in der IEC 60-1 für verschiedene Spannungsbeanspruchungsarten ausführlich beschrieben.

Bei der Bestimmung der Koordinations-Stehspannung sollte daran gedacht werden, daß bezüglich der Isolationsfestigkeit die ungünstigsten Bedingungen (d. h. geringe absolute Luftfeuchte, niedriger Luftdruck und hohe Temperatur) gewöhnlich nicht gleichzeitig auftreten. Außerdem heben sich lokal die für die Luftfeuchte und die umgebenden Temperaturschwankungen anwendbaren Korrekturen in der Regel gegenseitig auf. Demzufolge kann die Bewertung der Festigkeit gewöhnlich auf den mittleren Umgebungsbedingungen vor Ort beruhen.

Für Isolatoren sollte die durch Schnee, Eis, Tau oder Nebel bedingte mögliche Reduzierung der Stehspannung in Betracht gezogen werden.

3.1.4 Durchschlagwahrscheinlichkeit der Isolation

Zur Zeit gibt es kein Verfahren zur Bestimmung der Durchschlagwahrscheinlichkeit an einem Einzelstück einer nichtselbsteilenden Isolierung. Es wird deshalb vorausgesetzt, daß sich bei dem als Stehspannung definierten Wert die Steh-Wahrscheinlichkeit von 0 % auf 100 % verändert.

Für selbstheilende Isolierungen kann die dielektrische Festigkeit bei Stoßspannungseinwirkungen gegebener Form mit statistischen Größen beschrieben werden. Die bei der Bestimmung der Steh-Wahrscheinlichkeitskurve einzuhaltenen Verfahren sind in der IEC 60-1 gegeben. Für eine gegebene Isolierung sowie für Impulse mit gegebener Form und unterschiedlichen Scheitelwerten U kann eine Entladungswahrscheinlichkeit P jedem möglichen Wert U zugeordnet werden. Damit ergibt sich die Beziehung $P = P(U)$. Gewöhnlich steigt die Funktion P gleichmäßig mit den Werten für U an. Die resultierende Kurve kann durch die drei folgenden Parameter definiert werden:

- a) U_{50} : entspricht der Spannung, bei der die Isolation eine 50 %-Wahrscheinlichkeit für einen Überschlag aufweist.
- b) Z : ist die Standardabweichung, die die Streuung von Überschlagsspannungen darstellt. Sie ist als Differenz zwischen den Spannungen definiert, die den Überschlagwahrscheinlichkeiten 50 % und 16 % entsprechen, wie in Gleichung (4) dargestellt.

$$Z = U_{50} - U_{16} \quad (4)$$

- c) U_0 : ist die höchste Spannung, von der angenommen wird, daß darunter kein Durchschlag erfolgt (Abbruchwert). Die Bestimmung dieses Wertes ist jedoch bei praktischen Prüfungen nicht möglich.

Gewöhnlich ist die Funktion P durch eine mathematische Funktion (Summenhäufigkeitsverteilung) gegeben, die durch die Parameter U_{50} , Z und U_0 vollständig beschrieben ist. Bei der traditionsgemäß angewendeten Gaußschen Verteilung ist der Wert für U_{50} auch der Mittelwert, und die konventionelle Abweichung wird direkt aus der Gleichung (4) ermittelt. Der Abbruchpunkt wird der Einfachheit halber gewöhnlich vernachlässigt.

Bei der Anwendung des statistischen Verfahrens zur Isolationskoordination für langsam ansteigende Überspannungen hat die Verwendung der in Gleichung (5) gegebenen modifizierten Weibull-Verteilung Vorteile gegenüber der Gaußschen Verteilung (die Vorteile sind in Anhang C erläutert). Gleichung (5) stellt eine Weibull-Verteilung mit Parametern dar, die so gewählt sind, daß sie mit einer Gaußschen Verteilungsfunktion an der 50 %- und 16 %-Überschlagwahrscheinlichkeit und am Abbruch der Verteilung bei $U_{50} - NZ$ gut übereinstimmt (siehe Anhang C).

$$P(U) = 1 - 0,5^{\left(1 + \frac{x}{N}\right)^{\gamma}} \quad (5)$$

Dabei ist:

$$x = \frac{U - U_{50}}{Z}.$$

x : auf die Standardabweichungen bezogene Differenz $U - U_{50}$ der Verteilungsfunktion $P(U)$

N : Anzahl der Standardabweichungen entsprechend der Abbruchspannung U_0 , bei der $P(U_0) = 0$ ist

Bei einer konventionellen Abweichung der Gaußschen Wahrscheinlichkeitsverteilung (bei $x = -1$) ist in der Gleichung (5) die Funktion $P(U_0) = 0,16$. Wenn $N = 4$ gewählt wird, muß in der Gleichung (5) für γ der genaue Wert 4,83 betragen. Eine Näherung dieses Wertes auf $\gamma = 5$ führt zu keinen nennenswerten Fehlern, so daß die in dieser Richtlinie vorgeschlagene modifizierte Weibull-Verteilung in Gleichung (6) beschrieben werden kann:

$$P(U) = 1 - 0,5^{\left(1 + \frac{x}{4}\right)^5} \quad (6)$$

Bild 4 veranschaulicht diese modifizierte Weibull-Verteilung zusammen mit der Gaußschen Verteilung, an die sie angepaßt ist. Bild 5 stellt die gleichen Verteilungen mit Gaußschen Wahrscheinlichkeitsmaßstäben dar.

Für statistische Berechnungen zum erwarteten Betriebsverhalten sollten ausführliche Daten aus Betriebs- oder Laborprüfungen verwendet werden. Wenn solche Daten nicht vorhanden sind, werden für statistische Berechnungen nachfolgende Werte für die konventionelle Abweichung empfohlen. Sie wurden aus einer großen Anzahl von Versuchsergebnissen abgeleitet:

- für Blitzstoßspannungen: $Z = 0,03 U_{50}$ [kV];
- für Schaltstoßspannungen: $Z = 0,06 U_{50}$ [kV].

Der Einfluß von Wetterbedingungen (siehe 3.1.3) ist in den vorstehend angegebenen Werten der Streuung enthalten.

Die in IEC 71-1 verwendete statistische Stehspannung U_{10} (90 % Stehwahrscheinlichkeit entsprechend U_{10}) kann unter Verwendung von Gleichung (5) und in Verbindung mit der Standardabweichung Z nach Gleichung (7) beschrieben werden:

$$U_{10} = U_{50} - 1,3 Z. \quad (7)$$

Anhang C enthält ausführliche Informationen und statistische Formeln, die auf viele identische parallel angeordnete Isolierungen, die gleichzeitig beansprucht werden, anzuwenden sind.

Anhang G enthält die Anleitung zur Bestimmung der Überschlagsfestigkeit einer Luftisolierung bei den verschiedenen Arten von Überspannungen.

3.2 Auswahlkriterium

Nach IEC 71-1, 3.22 besteht das von der Isolierung für den Betrieb zu fordernde Auswahlkriterium in der akzeptablen Fehlerrate (R_a).

Das Betriebsverhalten der Isolierung wird aufgrund der Anzahl von Isolationsfehlern während des Betriebes bewertet. Fehler in verschiedenen Netzteilen können unterschiedliche Folgen haben. In einem vermaschten Netz zum Beispiel ist ein bleibender Leitungsfehler oder das erfolglose Wiedereinschalten infolge langsam ansteigender Überspannungen nicht so schwerwiegend wie ein Sammelschienenfehler oder entsprechende Fehler in einem Strahlennetz. Deshalb können akzeptable Fehlerraten, in Abhängigkeit von den Folgen eines Versagens an jedem dieser Punkte, von Punkt zu Punkt unterschiedlich sein.

Beispiele für akzeptable Fehlerraten können aus Fehlerstatistiken entnommen werden, die sich auf vorhandene Netze beziehen, sowie aus Projektplanungen, bei denen Statistiken in Betracht gezogen wurden. Für Betriebsmittel liegen die akzeptablen Fehlerraten R_a infolge von Überspannungen – abhängig von den Reparaturzeiten – im Bereich $0,001/a < R_a < 0,004/\text{Jahr}$. Durch Blitz bedingte akzeptable Fehlerraten für Freileitungen bewegen sich im Bereich $(0,1/100 \text{ km})/a < R_a < (20/100 \text{ km})/\text{Jahr}$ (wobei die größte Anzahl auf Verteilungsleitungen zutrifft). Entsprechende Zahlen für durch Schaltüberspannungen bedingte akzeptable Fehlerraten liegen im Bereich 0,01 bis 0,001 pro Schalterbetätigung. Werte für akzeptable Fehlerraten sollten in diesen Größenordnungen liegen.

3.3 Verfahren der Isolationskoordination

Die Bestimmung der Koordinationsstehspannung beruht auf der Ermittlung des niedrigsten Wertes der Stehspannung einer Isolierung. Diese hat das Auswahlkriterium zu erfüllen, wenn sie der repräsentativen Überspannung unter Betriebsbedingungen ausgesetzt ist.

Für die Isolationskoordination bei transienten Überspannungen werden zwei Verfahren angewendet: ein deterministisches und ein statistisches Verfahren. Viele der angewendeten Vorgehensweisen sind jedoch eine Mischung aus beiden Verfahren. Zum Beispiel sind manche Faktoren, die in deterministischen Verfahren zur Anwendung gelangen, aus statistischen Überlegungen abgeleitet worden, oder aber einige statistische Variable werden in statistischen Verfahren vernachlässigt.

Deterministisches Verfahren

Das deterministische Verfahren wird gewöhnlich dann angewendet, wenn keine durch Prüfung bestimmten statistischen Informationen zur Verfügung stehen, die über mögliche Fehlerraten des Betriebsmittels im Betrieb Auskunft geben.

Die Anwendung des deterministischen Verfahrens ist möglich:

- wenn die Isolierung durch ihre konventionelle angenommene Stehspannung ($P_w = 100$ %) gekennzeichnet ist; der Stehspannungswert wird gleich der Koordinationsstehspannung gewählt, die durch Multiplikation der repräsentativen Überspannung (ein angenommener Höchstwert) mit einem Koordinationsfaktor K_c ermittelt wird; dieser berücksichtigt die Unsicherheiten in den Annahmen für die zwei Werte: angenommene Stehspannung und repräsentative Überspannung;
- wenn die Isolierung – so wie bei äußeren Isolierungen – durch die statistische Stehspannung ($P_w = 90$ %) gekennzeichnet ist. K_c sollte auch die Differenz zwischen dieser Spannung und der angenommenen Stehspannung berücksichtigen.

Mit diesem Verfahren gibt es keine Angaben zu möglichen Fehlerraten des Betriebsmittels im Betrieb. Typische Beispiele sind:

- Isolationskoordination von inneren Isolierungen, die durch Überspannungsableiter gegen langsam ansteigende Überspannungen geschützt sind,
- Überspannungsschutz gegen Blitzüberspannungen für Betriebsmittel, die mit Freileitungen verbunden und für die Erfahrungen mit ähnlichen Betriebsmitteln vorhanden sind.

Statistisches Verfahren

Das statistische Verfahren beruht auf Ereignishäufigkeiten spezifischen Ursprungs: Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion der Überspannungen und Durchschlagwahrscheinlichkeitsverteilung der Isolierung. Es kann die Fehlerwahrscheinlichkeit ermittelt werden, indem die Überspannungs- und Durchschlagwahrscheinlichkeit vorzugsweise simultan kombiniert werden. Das geschieht ereignisbezogen unter Berücksichtigung der statistischen Natur der Überspannungen und Festigkeiten (z. B. Nutzung der Monte-Carlo-Methode).

Indem man die Berechnung für verschiedene Isolierungen und für verschiedene Netzzustände wiederholt, kann man die Gesamt-Nichtverfügbarkeit des Netzes infolge von Isolierungsfehlern ermitteln.

Somit gibt die Anwendung der statistischen Isolationskoordination die Möglichkeit, die Fehlerhäufigkeit direkt als Funktion der gewählten Auslegungsparameter des Netzes anzugeben. Prinzipiell wird damit eine Optimierung der Isolierung ermöglicht, wenn Ausfallkosten bestimmten Fehlerarten zugeordnet werden können. In der Praxis ist das sehr schwierig, denn die Konsequenzen von Isolationsfehlern bei unterschiedlichen Netzzuständen und die Unsicherheit bei Angaben über nichtgelieferte Energie sind nur schwer erhältlich. Es ist daher besser, die Isolierung leicht überzudimensionieren als sie zu optimieren. Die Auslegung von Isoliersystemen beruht dann auf dem Vergleich der Fehlerrisiken unterschiedlicher Auslegungs-Alternativen.

3.3.1 Verfahren der Isolationskoordination für Betriebswechselspannung und zeitweilige Überspannungen

Die Koordinations-Stehspannung für die Betriebswechselspannung ist bei Leiter-Erde-Isolationen gleich der höchsten Leiter-Leiter-Netzspannung geteilt durch $\sqrt{3}$ mit einer Dauer, die der Lebensdauer entspricht (d. h. diese ist gleich dem angenommenen Maximalwert der repräsentativen Spannung, angegeben in 2.3.1).

Entsprechend dem deterministischen Verfahren ist die Koordinations-Kurzzeit-Stehspannung gleich der repräsentativen zeitweiligen Überspannung. Kommt ein statistisches Verfahren zur Anwendung, vorausgesetzt, daß die repräsentative zeitweilige Überspannung als Amplituden-/Zeit-Häufigkeitsverteilung (siehe 2.3.2) verfügbar ist, dann soll die Isolierung bestimmt werden, die das Auswahlkriterium erfüllt. Die Amplitude der Koordinations-Stehspannung soll so sein, daß sie der Dauer von 1 Minute auf der Amplituden-/Zeit-Charakteristik der Isolierung entspricht.

3.3.1.1 Verschmutzung

Bei Verschmutzung ist das Verhalten der äußeren Isolierung gegenüber der Betriebswechselspannung wichtig und kann die Isolationsauslegung bestimmen. Überschlüge der Isolierung treten in der Regel auf, wenn die Oberfläche verschmutzt ist und infolge von leichtem Regen, Schnee, Tau oder Nebel angefeuchtet wird, ohne einen bemerkenswerten Abwascheffekt zu erreichen.

Für Isolationszwecke werden qualitativ vier Verschmutzungspegel festgelegt. [Tabelle 1](#) gibt für jeden Verschmutzungspegel eine angenäherte Beschreibung einiger typischer Umgebungen. Isolatoren müssen dauernd die höchste Betriebsspannung unter verschmutzten Bedingungen mit annehmbarem Risiko aushalten. Die Koordinations-Stehspannungen sind gleich den repräsentativen Überspannungen, und das Auswahlkriterium ist erfüllt, wenn man einen angemessenen Verschmutzungsgrad wählt, der dem Verschmutzungsgrad vor Ort entspricht. Daher ist die dauernd anliegende Betriebswechselspannung (das ist die Koordinations-Stehspannung) gleich der höchsten Leiter-Leiter-Netzspannung. Sie wird durch $\sqrt{3}$ geteilt, wenn man die Leiter-Erde-Isolation betrachtet.

Eine Abschätzung des Verschmutzungspegels für spezielle Gebiete kann entsprechend [Tabelle 1](#) erfolgen. Für eine quantitative Erfassung der Verschmutzungspegel durch Vor-Ort-Messung gibt IEC 815 die notwendigen Informationen.

Verschiedene Isolortypen einerseits und deren Lage andererseits können unterschiedliche Verschmutzungswerte in der gleichen Umgebung ansammeln. Ferner können sie für denselben Verschmutzungsgrad unterschiedliche Überschlugscharakteristiken aufweisen. Unterschiede in der Art der Verschmutzung können darüber hinaus manche Isolatorformen besser erscheinen lassen als andere. Deshalb sollte für Koordinierungszwecke ein Maß des Verschmutzungsgrades für jeden einzusetzenden Isolortyp bestimmt werden.

An Einbauorten mit einem hohen Verschmutzungsgrad dürfen erleichternde Maßnahmen wie Fetten oder Waschen der Isolierflächen in Betracht gezogen werden.

[Tabelle 1](#) enthält zur Information spezifische Kriechstrecken, die für die Isolationsfestigkeit bei den vier Verschmutzungsgraden erforderlich sind. Diese Strecken dienen mehr dem Isolatorentwurf als der Isolationskoordination. [IEC 507](#) bringt jeden Verschmutzungsgrad nach [Tabelle 1](#) mit einem Bereich verschiedener Verschmutzungs-Schärfegrade bei Prüfungen mit künstlichen Fremdschichten in Zusammenhang. Es bleibt die Aufgabe der zuständigen Gerätekomitees, die Prüfanforderungen festzulegen, um das Stehvermögen von Isolatoren unter Verschmutzungsbedingungen nachzuweisen.

Tabelle 1: Empfohlene Kriechstrecken

Verschmutzungs-grad	Beispiele typischer Umgebungen	Kleinster bezogener Nenn-Kriechweg mm/kV ¹⁾
I LEICHT	– Gebiete ohne Industrie und mit geringer Dichte von Häusern mit Heizungsanlagen – Gebiete mit geringer Dichte an Industrie oder Häusern, die aber häufig Winden und/oder Regenfällen ausgesetzt sind – Landwirtschaftliche Gebiete²⁾ – Bergige Gebiete Alle diese Gebiete müssen mindestens 10 km bis 20 km vom Meer entfernt sein und dürfen keinen direkten Seewinden ausgesetzt sein.³⁾	16,0
II MITTEL	– Gebiete mit Industrie, die keine besonders verschmutzenden Abgase erzeugt und/oder mit einer durchschnittlichen Dichte von Häusern mit Heizungsanlagen – Gebiete mit hoher Dichte von Häusern und/oder Industrien, die aber häufig Winden und/oder Regenfällen ausgesetzt sind – Gebiete, die Seewind ausgesetzt sind, aber nicht zu nahe an der Küste liegen (mindestens mehrere km entfernt)³⁾	20,0
III STARK	– Gebiete mit hoher Industriedichte und Vorstädte großer Städte mit hoher Dichte an Verschmutzung verursachenden Heizungsanlagen – Gebiete, die nahe am Meer liegen oder in jedem Fall verhältnismäßig starken Seewinden ausgesetzt sind³⁾	25,0
IV SEHR STARK	– Gebiete mit begrenztem Ausmaß, die leitfähigen Stäuben und Industrieabgasen ausgesetzt sind, welche besonders dicke und leitfähige Niederschläge bilden – Gebiete mit begrenztem Ausmaß, die sehr nahe an der Küste liegen und Sprühwirkungen vom Meer oder sehr starken und verschmutzenden Seewinden ausgesetzt sind – Wüstengebiete, gekennzeichnet durch lange, regenlose Perioden, die Sand und Salz mitführenden Winden sowie regelmäßiger Kondensation ausgesetzt sind	31,0
ANMERKUNG: Diese Tabelle kann nur für Glas- oder Porzellanisolatoren angewendet werden. Sie enthält keine Umweltbedingungen wie Schnee und Eis mit starker Verschmutzung, starke Regenfälle, Dürregebiete usw. 1) Nach IEC 815, kleinster Nennkriechweg für Isolatoren zwischen Leiter und Erde, bezogen auf die höchste Spannung für Betriebsmittel (Leiter gegen Leiter). 2) Das Versprühen von Düngemitteln oder das Verbrennen von Pflanzenresten kann durch Windverwehung zu einem höheren Verschmutzungsgrad führen. 3) Entfernungen von der Meeresküste sind von der Topographie des Küstengebietes und von den extremen Windbedingungen abhängig.		

3.3.2 Verfahren der Isolationskoordination für langsam ansteigende Überspannungen

3.3.2.1 Deterministisches Verfahren

Das deterministische Verfahren beinhaltet die Bestimmung der größten Spannungsbeanspruchung für das Betriebsmittel und danach die Auswahl der dielektrischen Mindestfestigkeit dieses Betriebsmittels mit einer Marge, die die Unsicherheiten bei der Bestimmung dieser Werte umfaßt. Die Koordinationsstehspannung erhält man durch Multiplizieren des angenommenen Höchstwertes der entsprechenden repräsentativen Überspannung mit dem deterministischen Koordinationsfaktor K_{cd} .

Für Betriebsmittel, die durch Überspannungsableiter geschützt sind, ist die angenommene maximale Überspannung gleich dem Schaltstoßschutzpegel U_{ps} des Überspannungsableiters. In solchen Fällen kann es jedoch zu