

	DIN VDE 0184 (VDE 0184)	
	Diese Norm ist zugleich eine VDE-Leitlinie im Sinne von VDE 0022. Sie ist nach Durchführung des vom VDE-Präsidium beschlossenen Genehmigungsverfahrens unter der oben angeführten Nummer in das VDE-Vorschriftenwerk aufgenommen und in der „etz Elektrotechnik + Automation“ bekannt gegeben worden.	
ICS 29.120.50 Überspannungen und Schutz bei Überspannungen in Niederspannungs-Starkstromanlagen mit Wechselspannungen – Allgemeine grundlegende Informationen (IEC TR 62066:2002) Surge overvoltages and surge protection in low-voltage a.c. power systems – General basic information (IEC TR 62066:2002) Surtensions de choc et protection contre la foudre dans les réseaux à basse tension – Informations générales fondamentales (CEI TR 62066:2002) Gesamtumfang 133 Seiten DKE Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik im DIN und VDE		

Beginn der Gültigkeit

Diese Norm gilt ab 2005-10-01.

Nationales Vorwort

Vorausgegangener Norm-Entwurf: E DIN VDE 0100-534 Beiblatt 1 (VDE 0100-534 Beiblatt 1):1999-07.

Für die vorliegende Norm ist das nationale Arbeitsgremium UK 221.2 „Schutz gegen thermische Auswirkungen/Sachsenschutz“ der DKE Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik im DIN und VDE zuständig.

Die enthaltene IEC-Publikation wurde vom TC 64 „Electrical installations and protection against electric shock“ erarbeitet.

Das IEC-Komitee hat entschieden, dass der Inhalt dieser Publikation bis zum Jahr 2006 unverändert bleiben soll. Zu diesem Zeitpunkt wird entsprechend der Entscheidung des Komitees die Publikation

- bestätigt,
- zurückgezogen,
- durch eine Folgeausgabe ersetzt oder
- geändert.

Nationaler Anhang NA (informativ)

Zusammenhang mit Europäischen und Internationalen Normen

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.

Eine Information über den Zusammenhang der zitierten Normen mit den entsprechenden Deutschen Normen ist nachstehend wiedergegeben.

Tabelle NA.1

Europäische Norm	Internationale Norm	Deutsche Norm	Klassifikation im VDE-Vorschriftenwerk
–	IEC 60364-4-44:2001-08	– Vorläufer: DIN VDE 0100-442 (VDE 0100-442):1997-11 DIN VDE 0100-443 (VDE 0100-443):2002-01 DIN VDE 0100-444 (VDE 0100-444):1999-10	– VDE 0100-442 VDE 0100-443 VDE 0100-444
–	IEC 60364-5-53:2001-08	vergleichbar mit E DIN VDE 0100-530 (VDE 0100-530):2004-06	VDE 0100-530
EN 60664-1:2003	IEC 60664-1:1992 + A1:2000 + A2:2002	DIN EN 60664-1 (VDE 0110-1):2003-11	VDE 0110-1
–	IEC/TR2 61000-2-5:1995-09	–	–

Europäische Norm	Internationale Norm	Deutsche Norm	Klassifikation im VDE-Vorschriftenwerk
EN 61000-4-1:2000	IEC 61000-4-1:2000	DIN EN 61000-4-1 (VDE 0847-4-1):2001-06	VDE 0847-4-1
EN 61000-4-4:1995 + A1:2001 + A2:2001	IEC 61000-4-4:1995 + A1:2000 + A2:2001	DIN EN 61000-4-4 (VDE 0847-4-4):2002-07	VDE 0847-4-4
EN 61000-4-5:1995 + A1:2001	IEC 61000-4-5:1995 + A1:2000	DIN EN 61000-4-5 (VDE 0847-4-5):2001-12	VDE 0847-4-5
–	IEC/TR3 61000-5-2:1997-11 ^{N1)}	–	–
–	IEC 61024-1:1990-03 ^{N1)}	–	–
–	IEC 61024-1-1:1993-08 ^{N1)}	–	–
–	IEC 61312-1:1995-02 ^{N1)}	–	–
–	IEC/TS 61312-3:2000-07 ^{N1)}	–	–
–	IEC 61643-1:1998-2 ^{N1)}	–	–
–	IEC 61643-12:2002-02 ^{N1)}	–	–
–	IEC/TR2 61662:1995-04 ^{N1)}	–	–
EN 61663-2:2001	IEC 61663-2:2001	DIN EN 61663-2 (VDE 0845-4-2):2002-07	VDE 0845-4-2
–	ITU-T K.20:2003-07	–	–
–	ITU-T K.21:2003-07	–	–
–	IEEE 1036:1992	–	–

Nationaler Anhang NB (informativ)

Literaturhinweise

DIN EN 60664-1 (VDE 0110-1):2003-11, Isolationskoordination für elektrische Betriebsmittel in Niederspannungsanlagen – Teil 1: Grundsätze, Anforderungen und Prüfungen (IEC 60664-1:1992 + A1:2000 + A2:2002); Deutsche Fassung EN 60664-1:2003.

DIN EN 61000-4-1 (VDE 0847-4-1):2001-06, Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV) – Teil 4-1: Prüf- und Messverfahren – Übersicht über die Reihe IEC 61000-4 (IEC 61000-4-1:2000); Deutsche Fassung EN 61000-4-1:2000.

DIN EN 61000-4-4 (VDE 0847-4-4):2002-07, Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV) – Teil 4-4: Prüf- und Messverfahren – Prüfung der Störfestigkeit gegen schnelle transiente elektrische Störgrößen/Burst (IEC 61000-4-4:1995 + A1:2000 + A2:2001); Deutsche Fassung EN 61000-4-4:1995 + A1:2001 + A2:2001.

DIN EN 61000-4-5 (VDE 0847-4-5):2001-12, Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV) – Teil 4-5: Prüf- und Messverfahren – Prüfung der Störfestigkeit gegen Stoßspannungen (IEC 61000-4-5:1995 + A1:2000); Deutsche Fassung EN 61000-4-5:1995 + A1:2001.

DIN EN 61663-2 (VDE 0845-4-2):2002-07, Blitzschutz – Telekommunikationsleitungen – Teil 2: Leitungen mit metallischen Leitern (IEC 61663-2:2001); Deutsche Fassung EN 61663-2:2001.

^{N1)} Nationale Fußnote: Die IEC-Publikation wird durch IEC 62305 ersetzt.

DIN VDE 0184 (VDE 0184):2005-10

DIN VDE 0100-442 (VDE 0100-442):1997-11, *Elektrische Anlagen von Gebäuden – Teil 4: Schutzmaßnahmen – Kapitel 44: Schutz bei Überspannungen – Hauptabschnitt 442: Schutz von Niederspannungsanlagen bei Erdschlüssen in Netzen mit höherer Spannung; Deutsche Fassung HD 384.4.442 S1:1997.*

DIN VDE 0100-443 (VDE 0100-443):2002-01, *Errichten von Niederspannungsanlagen – Teil 4: Schutzmaßnahmen – Kapitel 44: Schutz bei Überspannungen – Hauptabschnitt 443: Schutz bei Überspannungen infolge atmosphärischer Einflüsse oder von Schaltvorgängen (IEC 60364-4-443:1995, modifiziert); Deutsche Fassung HD 384.4.443 S1:2000.*

DIN VDE 0100-444 (VDE 0100-444):1999-10, *Elektrische Anlagen von Gebäuden – Teil 4: Schutzmaßnahmen – Kapitel 44: Schutz bei Überspannungen – Hauptabschnitt 444: Schutz gegen elektromagnetische Störungen (EMI) in Anlagen von Gebäuden (IEC 60364-4-444:1996, modifiziert); Deutsche Fassung CENELEC R064-004:1999.*

E DIN VDE 0100-530 (VDE 0100-530):2004-06, *Errichten von Niederspannungsanlagen – Teil 530: Auswahl und Errichtung elektrischer Betriebsmittel – Schalt- und Steuergeräte.*

Inhalt

NATIONALE ANMERKUNG Die Zahlen in eckigen Klammern geben die Quelle laut „Literaturhinweise“ an.

	Seite
1 Anwendungsbereich	10
2 Normative Verweisungen	10
3 Begriffe	11
4 Überspannungen in Niederspannungssystemen	13
5 Blitzüberspannungen	14
5.1 Allgemeines	14
5.2 Ursprung von Blitzüberspannungen	19
5.3 Blitzüberspannungen, übertragen aus Mittelspannungssystemen	22
5.4 Überspannungen, verursacht durch einen Direkteinschlag in Niederspannungsleitungen	24
5.5 In Niederspannungssysteme induzierte Blitzüberspannungen	24
5.6 Beispiele von induzierten Überspannungen	26
5.7 Überspannungen, verursacht durch Blitzeinschläge in Gebäude oder in deren unmittelbarer Nähe	28
5.8 Zusammenfassung zu Blitzüberspannungen	32
6 Schaltüberspannungen	32
6.1 Allgemeines	32
6.2 Auslösen von Leistungsschaltern und Schaltern	36
6.3 Auslösen von Sicherungen	37
6.4 Häufigkeit von Ereignissen	38
6.5 Wechselwirkungen mit Überspannung-Schutzeinrichtungen (ÜSE)	39
6.6 Zusammenfassung zu Schaltüberspannungen	39
7 Zeitweilige Überspannungen	40
7.1 Allgemeines	40
7.2 Intensität zeitweiliger Überspannungen auf Grund von Mittelspannungs- und Niederspannungsstörungen	40
7.3 Zeitweilige Überspannungen auf Grund von Fehlern in der Niederspannungsanlage	42
7.4 Wahrscheinlichkeit von Ereignissen und Schadenshöhe	43
7.5 Zusammenfassung zu zeitweiligen Überspannungen	45
8 Überspannungen auf Grund von Wechselwirkungen zwischen Systemen	46
8.1 Allgemein	46
8.2 Wechselwirkung zwischen Stromversorgungssystem und Nachrichtensystem	46
8.3 Weitere Wechselwirkungen	47
8.4 Zusammenfassung zu Überspannungen auf Grund von Wechselwirkungen zwischen Systemen	47
9 Bemerkungen zu Überspannungen und Ausfallraten	48
9.1 Allgemein	48
9.2 Auswertung von Ausfalldaten in der Praxis	48
9.3 Zusammenfassung der Bemerkungen zu Überspannungen und Ausfallraten	49
10 Überlegungen zu Systemausfällen/Betriebsmittelversagen/Bränden	50
10.1 Allgemeines	50
10.2 Vermeiden von Störbeeinflussungen beim Betrieb von Anlagen	50
10.3 Vorbeugung gegen dauerhafte Schäden	51
10.4 Kosten von überspannungsbedingten Störungen und Ausfällen	52
10.5 Zusammenfassung zu Ausfällen und Versagen	53
11 Überlegungen zum Einsatz von Schutz bei Überspannung	54

	Seite
11.1 Allgemeines	54
11.2 Konfiguration der Energieversorgung	54
11.3 Arten von Anlagen	55
11.4 Auftreten von Überspannungen	55
11.5 Abtrennvorrichtung einer Überspannung-Schutzeinrichtung (ÜSE)	55
11.6 Risikoabschätzung	56
11.7 Zusammenfassung der Betrachtungen über die Notwendigkeit von Schutz bei Überspannung	58
12 Anwendung von Schutz bei Überspannung	58
12.1 Allgemeines	58
12.2 Überspannung-Schutzeinrichtungen (ÜSE) für den Einsatz in Verteilungssystemen	59
12.3 Grundlegende Netzcharakteristika bei der Auswahl von Überspannung-Schutzeinrichtungen (ÜSE)	61
12.4 Betrachtungen zum Einbau von Überspannung-Schutzeinrichtungen (ÜSE)	65
12.5 Koordination zwischen Überspannung-Schutzeinrichtungen (ÜSE) und dem zu schützenden Betriebsmittel	67
12.6 Zusammenfassung zur Anwendung von Überspannung-Schutzeinrichtungen (ÜSE)	69
Anhang A (informativ) Zusätzliche Informationen zu blitzbedingten Überspannungen	71
Anhang B (informativ) Schaltüberspannungen	81
Anhang C (informativ) Ergänzende Informationen zu zeitweiligen Überspannungen	96
Anhang D (informativ) Ergänzende Informationen zu Überspannungen resultierend aus Wechselwirkungen zwischen unterschiedlichen Systemen (siehe Abschnitt 8)	100
Anhang E (informativ) Zusätzliche Informationen zur Anwendung von Überspannung-Schutzeinrichtungen (ÜSE)	106
Anhang F (informativ) Vermeiden von Überspannungen durch gute EMV-Praktiken bei Erdung und Verkabelung	128
Literaturhinweise	131
 Bild 1 – Beispiele für Kopplungsmechanismen bei Blitzeinschlägen	 14
Bild 2 – Beispiele für Blitzeinschläge in einem komplexen elektrischen System	15
Bild 3 – Mögliche Wellenformen von Blitzströmen bei einem Einschlag in Objekte, die sich am Erdboden befinden	16
Bild 4 – Frequenzverteilung der Spitzenströme für drei Arten von Blitzereignissen	17
Bild 5 – Karte der jährlichen Gewittertage [7]	19
Bild 6 – Direkter Blitzeinschlag in eine Freileitung	19
Bild 7 – Beispiel für die ohmsche Kopplung von einer Blitzschutzanlage	22
Bild 8 – Typische Erdkopplungs-Mechanismen	23
Bild 9 – Typische Überspannungen auf einer NS-Leitung – Induziert auf Grund eines Naheinschlags	25
Bild 10 – Beispiel für eine abgeschätzte Häufigkeit von unbeeinflussten (prospektiven), induzierten Blitzüberspannungen auf NS-Freileitungen	26
Bild 11 – Modell des für die Computersimulation verwendeten Verteilungssystems	27
Bild 12 – Modell zur Berechnung der Blitzstromverteilung unter parallelen Gebäuden am Beispiel eines TN-C-Systems	29
Bild 13 – Erzeugung einer Überspannung durch Schalten eines RLC-Kreises	33
Bild 14 – Typische Verläufe von Schaltüberspannungen	34
Bild 15 – Beispiel für eine hochfrequente Schaltüberspannung	34
Bild 16 – Verteilung der Anstiegssteilheiten von Schaltüberspannungen an unterschiedlichen Standorten	35
Bild 17 – Verteilung der Anstiegssteilheiten von Schaltüberspannungen	35
Bild 18 – Anstiegssteilheit von Schaltüberspannungen und deren Scheitelwerte	35

	Seite
Bild 19 – Verteilung der Dauer (Rückenhalfwertszeiten) von Schaltüberspannungen.....	36
Bild 20 – Beispiel für die Amplitudenverteilung von Schaltüberspannungen – gemessen in einem industriellen 230/400-V-Verteilungssystem.....	37
Bild 21 – Schaltüberspannung bei Kurzschlussstromunterbrechung durch eine Feinsicherung [48]	38
Bild 22 – Verteilung der relativen Wahrscheinlichkeit von Schaltüberspannungsereignissen in verschiedenen Anlagen	39
Bild 23 – PC/Modem-Verbindungen zum Stromversorgungssystem und zum Fernmelde- und informationstechnischen System.....	47
Bild 24 – Beispiel für die Blitzstromaufteilung auf externe Leitungen (TT-System)	63
Bild 25 – Notwendige Auswahlkriterien für eine Überspannung-Schutzeinrichtung (ÜSE).....	65
Bild 26 – Auswirkung einer zusätzlichen Anschlussleitung auf die Begrenzungsspannung eines Varistors.....	67
Bild 27 – Grundmodell für die energetische Koordination von zwei Überspannung-Schutzeinrichtungen (ÜSE)	68
Bild A.1 – Häufigkeitsverteilung der Blitz-Spitzenströme $I_{\max}$	71
Bild A.2 – Häufigkeitsverteilung der Gesamt-Blitzladung Q_{gesamt}	72
Bild A.3 – Häufigkeitsverteilung der transienten Blitzladung Q_{trans}	72
Bild A.4 – Häufigkeitsverteilung der spezifischen Blitzenergie W/R	73
Bild A.5 – Häufigkeitsverteilung des maximalen Anstiegs des transienten Stroms $(di/dt)_{\max}$	73
Bild A.6 – Häufigkeitsverteilung des Stroms $(di/dt)_{30/90\%}$ von negativen Folgestoßströmen	74
Bild A.7 – Vereinfachtes Beispiel für einen Blitzeinschlag in eine Niederspannungsfreileitung.....	74
Bild A.8 – Unbeeinflusste (prospektive) Spannungen zwischen der Netzleitung und der „echten“ Erde am Einschlagpunkt (Knoten 1), am Transformator (Knoten 2) und am Neutraleiter in der Kundenanlage (Knoten 3)	75
Bild A.9 – Unbeeinflusste (prospektive) Spannungen am Knoten 3 und am Knoten 4 bezogen auf die „echte“ Erde	75
Bild A.10 – Strom gegen Erde am Einschlagpunkt (Knoten 1), am Transformator (Knoten 2) und in der Verbraucheranlage (Knoten 3)	75
Bild A.11 – Verteilung der Scheitelwerte von Überspannungen, aufgezeichnet auf der Primärseite eines Mittelspannungs-/Niederspannungstransformators.....	76
Bild A.12 – Schaltkreis, verwendet für die statistische Berechnung.....	77
Bild A.13 – Vergleich von gemessenen Überspannungen [51] und errechneten Überspannungen (ANASTASIA)	77
Bild A.14 – Modell zur Berechnung der Blitzstromverteilung unter parallelen Gebäuden am Beispiel eines TN-C-Systems [24]	78
Bild A.15 – Blitzstromverteilung der Blitzteilströme unter den einzelnen, in Bild A.14 definierten, Pfaden	79
Bild A.16 – Modell zur Berechnung der Blitzstromverteilung unter parallelen Gebäuden (TN-C-System, Gebäude 2 ohne äußere Blitzschutzanlage und ohne Überspannung-Schutzeinrichtungen (ÜSE) am Gebäudeeintritt der Niederspannungsversorgung) [24]	79
Bild A.17 – Strom- und Spannungsverläufe für das Beispiel in Bild A.16	80
Bild B.1 – Beispiel zur Darstellung transients Resonanzen, verursacht durch Schalthandlungen	82
Bild B.2 – Berechnete Überspannungen für die Netzknoten von Beispiel B.1	82
Bild B.3 – Typische Überspannung, die beim Einschalten einer Kondensatorbatterie auftritt	83
Bild B.4a – Erhöhungsbedingung	84
Bild B.4b – Spannungserhöhungseffekt	84
Bild B.4 – Erhöhung einer Kondensator-Schaltüberspannung an einer räumlich entfernten Kondensatorbatterie (IEEE 1036)	84
Bild B.5 – Entstehungsprinzip von Überspannungen – erzeugt durch eine Kurzschlussstromabschaltung.....	85

	Seite
Bild B.6 – Beispiel für die Untersuchung von Schaltüberspannungen in drei Anlagenarten	87
Bild B.7 – Beispiel für Schaltüberspannungen – gemessen in einer Industrieanlage nahe der Sammelschiene	88
Bild B.8 – Häufigkeit von Überspannungsereignissen an ausgewählten Orten und Gesamtergebnis.....	91
Bild B.9 – Testschaltkreis und Überspannung während des Auslösens eines Leitungsschutzschalters auf Grund einer Einschaltstromüberlast.....	93
Bild B.10 – Beispiel für eine Überspannung auf der sekundären Sammelschiene eines 230-/440-V-Transformators, beim Auslösen von 100-A-Schmelzsicherungen in einem Abgangsschaltkreis.....	94
Bild B.11 – Überspannungsfaktor aufgetragen über der Zeitdauer von Schaltüberspannungen in einem Verteilungssystem – bei einem Kurzschluss in der Nähe einer Abgangssicherung.....	95
Bild B.12 – Überspannung in einem Verteilungssystem abhängig von der Kabellänge bei unterschiedlichen Bemessungsstromstärken der Sicherung – bei Kurzschluss an einem Kabelende.....	95
Bild C.1 – Zeitweilige Überspannung als Ergebnis eines Fehlers auf der Primärseite des Verteilungstransformators in einem TN-System entsprechend nordamerikanischer Ausführung.....	98
Bild D.1 – PC/Modem-Verbindungen zum Stromversorgungssystem und zum Nachrichtensystem	101
Bild D.2 – Spannungsunterschied, der während des Stoßstroms zwischen PC/Modem auftritt.....	101
Bild D.3 – Spannung, aufgezeichnet während eines Stoßstroms über den Referenzpunkten für einen PC/ein Modem	103
Bild D.4 – Einfügen eines „Überspannung-Referenz-Ausgleichsableiter“ (Surge reference equalizer) an den Eingängen eines PC/Modems	104
Bild D.5 – Verringerung der Spannung zwischen den Eingängen durch einen „Überspannung-Referenz-Ausgleichsableiter“ (Surge reference equalizer).....	104
Bild E.1 – Beispiel für Überspannung-Schutzeinrichtungen (ÜSE) (MOV1 und MOV2)	107
Bild E.2 – Vergleich der U/I -Kennlinien von zwei MOV	107
Bild E.3 – Strom- und Spannungsverläufe aufgetragen über die Zeit für zwei spannungsbegrenzende Überspannung-Schutzeinrichtungen (ÜSE).....	107
Bild E.4 – Energieaufteilung zwischen zwei spannungsbegrenzenden Überspannung-Schutzeinrichtungen (ÜSE) aufgetragen über dem eingebrachten Stoßstrom	108
Bild E.5 – Idealisiertes Beispiel zur Darstellung von Aspekten bei der Koordination von Überspannung-Schutzeinrichtungen (ÜSE)	108
Bild E.6 – Berechnete Überspannung-Schutzeinrichtung-Spannungen und -Ströme für einen 2/20- μ s-Impuls – eingekoppelt im Knotenpunkt 1	109
Bild E.7 – Berechnete Überspannung-Schutzeinrichtung-Spannungen und -Ströme für einen 10/350- μ s-Impuls – eingekoppelt im Knotenpunkt 2	110
Bild E.8 – Berechnete Überspannung-Schutzeinrichtung-Spannungen und -Ströme für einen 10/350- μ s-Impuls – eingekoppelt im Knotenpunkt 1	111
Bild E.9 – Beispiel für die Koordination zwischen einer spannungsschaltenden Überspannung-Schutzeinrichtung (ÜSE) und einer spannungsbegrenzenden Überspannung-Schutzeinrichtung (ÜSE)	111
Bild E.10 – Strom- und Spannungsverläufe für das Beispiel von Bild E.9 – Kein Ansprechen der Funkenstrecke	112
Bild E.11 – Strom- und Spannungsverläufe für das Beispiel von Bild E.9 – Ansprechen der Funkenstrecke	113
Bild E.12 – Spannung über Funkenstrecke U_{FS} – abhängig von unterschiedlichen Lasten	113
Bild E.13 – Koordination zweier Überspannung-Schutzeinrichtungen (ÜSE) (spannungsschaltende Bauart)	114
Bild E.14 – Zwei ZnO-Varistoren mit dem gleichen Nennableitstoßstrom.....	115
Bild E.15 – Zwei ZnO-Varistoren mit unterschiedlichem Nennableitstoßstrom	117
Bild E.16 – Koordinationsprinzip nach Variante I.....	119

	Seite
Bild E.17 – Koordinationsprinzip nach Variante II	120
Bild E.18 – Koordinationsprinzip nach Variante III	120
Bild E.19 – Koordinationsprinzip nach Variante IV	120
Bild E.20 – Durchlassenergie-Methode (Let-through-energy method) mit Standardimpulsparametern	121
Bild E.21 – Steilheitsfaktor für Stoßstromimpulse	124
Bild F.1 – EMV-gerechtes Gehäuse schützt elektronische Betriebsmittel gegen Gleichtaktströme übertragen durch Leitungen	129
Bild F.2 – Einkopplung von Gleichtakt-Überspannung verursacht durch Schaltüberspannungen	129
Bild F.3 – Im Kontrollraum gemessene Spannungen über dem Kabel, das am anderen Ende kurzgeschlossen wurde, an der Oberseite des Transformators. Die Gleichtaktströme werden für die unterschiedlichen parallelen Erdschutzleiter (PEC) zwischen A und C gekennzeichnet	130
 Tabelle 1 – Eigenschaften und Einwirkungen von Blitzeinschlägen	15
Tabelle 2 – Statistik der signifikanten Parameter eines Blitzereignisses	18
Tabelle 3 – Unbeeinflusste Leiter-Erde-Überspannungspegel in Niederspannungsanlagen, Ereignisse pro Jahr	26
Tabelle 4 – Stromverteilung zwischen den verfügbaren Strompfaden für das Beispiel in Bild 12 (10/350 µs, 100 kA Blitzteilstrom)	30
Tabelle 5 – Rückenhalbwertszeit von Schaltüberspannungen bei unterschiedlichen Bemessungsstromstärken von Feinsicherungen	38
Tabelle 6 – Zulässige Höchstwerte von Überspannungen, die während Erdfehler auf der Mittelspannungsebene auftreten	42
Tabelle 7 – Mögliche Arten des Schutzes	66
Tabelle B.1 – Minimalwert, Maximalwert und Mittelwert von Amplitude und Anstiegssteilheit der aufgezeichneten Schaltüberspannungen an unterschiedlichen Standorten [48]	87
Tabelle B.2 – Verteilung der aufgezeichneten Transienten	89
Tabelle B.3. – Messorte und Ergebnisse der Langzeitmessungen (zweiter Teil) [1]	90
Tabelle B.4 – Amplitude und Anstiegssteilheit von Schaltüberspannungen bei unterschiedlichen Bemessungsstromstärken von Leitungsschutzschaltern [47]	92
Tabelle C.1 – Zulässige Höchstwerte von Überspannungen in Niederspannungsanlagen, die während Erdfehler auf der Mittelspannungsebene auftreten	96
Tabelle C.2 – Maximal mögliche TOV-Werte in Niederspannungsanlagen auf Grund von Fehlern im Niederspannungssystem	97
Tabelle E.1 – Notwendige Induktivitäten, um ein Ansprechen der Funkenstrecke sicherzustellen	114
Tabelle E.2 – Normierte Werte	122
Tabelle E.3 – Referenztabelle	122
Tabelle E.4 – Äquivalente Werte	122
Tabelle E.5 – Koordinationsbeispiel zwischen zwei Überspannung-Schutzeinrichtungen (ÜSE), getestet nach der Klasse II	126
Tabelle E.6 – Koordinationsbeispiel zwischen einer Überspannung-Schutzeinrichtung (ÜSE), geprüft nach den Klasse-I-Kriterien, und einer Überspannung-Schutzeinrichtung (ÜSE), geprüft nach den Klasse-II-Kriterien	127
Tabelle E.7 – Parameter für Klasse-I-Prüfung nach IEC 61643-1	127

1 Anwendungsbereich

IEC 62066 ist ein Technischer Bericht, der einen allgemeinen Überblick über die Arten von Überspannungen gibt, die in Niederspannungsanlagen auftreten können. Es werden sowohl typische Überspannungsgrößen und deren Dauer als auch die Häufigkeiten solcher Ereignisse beschrieben. Es werden auch Informationen zu Überspannungen gegeben, die aus Wechselwirkungen zwischen Starkstromsystemen und Fernmelde- und informationstechnischen Systemen resultieren.

Zusätzlich werden allgemeine Richtlinien bezüglich Schutzmitteln und -systemen bei Überspannung auf der Basis von Verfügbarkeit und Risikobetrachtungen, einschließlich Wechselwirkungen und der Notwendigkeit der Koordination und der Betrachtung von zeitweiligen Überspannungen bei der Auswahl von Überspannungsschutzeinrichtungen (ÜSE), gegeben.

2 Normative Verweisungen

Die folgenden zitierten Dokumente sind für die Anwendung dieses Dokuments erforderlich. Bei datierten Verweisungen gilt nur die in Bezug genommene Ausgabe. Bei undatierten Verweisungen gilt die letzte Ausgabe des in Bezug genommenen Dokuments (einschließlich aller Änderungen).

IEC 60364-4-44:2001, *Electrical installations of buildings – Part 4-44: Protection for safety – Protection against voltage disturbances and electromagnetic disturbances.*

IEC 60364-5-53:2001, *Electrical installations of buildings – Part 5-53: Selection and erection of electrical equipment – Isolation, switching and control.*

IEC 60664-1:1992, *Insulation coordination for equipment within low-voltage systems – Part 1: Principles, requirements and tests.*
Amendment 1 (2000)

IEC/TR 61000-2-5:1995, *Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 2: Environment – Section 5: Classification of electromagnetic environments. Basic EMC publication.*

IEC 61000-4-1:2000, *Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 4: Testing and measurement techniques – Overview of IEC 61000-4 series.*

IEC 61000-4-4:1995, *Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 4: Testing and measurement techniques – Section 4: Electrical fast transient/burst immunity test. Basic EMC publication.*

IEC 61000-4-5:1995, *Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 4: Testing and measurement techniques – Section 5: Surge immunity test.*
Amendment 1 (2000)

IEC/TR 61000-5-2:1997, *Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 5: Installation and mitigation guidelines – Section 2: Earthing and cabling.*

IEC 61024-1:1990, *Protection of structures against lightning – Part 1: General principles.*

IEC 61024-1-1:1993, *Protection of structures against lightning – Part 1: General principles – Section 1: Guide A – Selection of protection levels for lightning protection systems.*

IEC 61312-1:1995, *Protection against lightning electromagnetic impulse – Part 1: General principles.*

IEC/TS 61312-3:2000, *Protection against lightning electromagnetic pulse – Part 3: Requirements of surge protective devices (SPDs).*

IEC 61643-1:1998, *Surge protective devices connected to low-voltage power distribution systems – Part 1: Performance requirements and testing methods.*

IEC 61643-12:2002, *Low-voltage surge surge protective devices – Part 12: Surge protective devices connected to low-voltage power distribution systems – Selection and application principles.*

IEC 61662:1995, *Assessment of the risk of damage due to lightning.*
Amendment 1 (1996)

IEC 61663-2:2001, *Lighting protection – Telecommunications lines – Part 2: Lines using metallic conductors.*

ITU-T K.20, *Resistibility of telecommunication equipment installed in a telecommunications centre to overvoltages and overcurrents.*

ITU-T K.21, *Resistibility of telecommunication equipment installed in customers' premises to overvoltages and overcurrents.*

IEEE 1036:1992, *Guide for application of shunt power capacitors*.

ANMERKUNG Weitere Dokumente sind in den Literaturhinweisen aufgeführt, welche Dokumente beinhalten, die zum Erstellen dieses vorliegenden Berichts verwendet wurden, Dokumente, die zur Unterstützung einer Empfehlung zitiert werden und Dokumente, die als Literatur für weitere Informationen vorgeschlagen werden.

3 Begriffe

Für die Anwendung dieses Technischen Berichts gelten sowohl die Begriffe und Definitionen, die in einschlägigen IEC-Veröffentlichungen gegeben sind (siehe [Abschnitt 2](#)), als auch die Begriffe, die nachfolgend aufgelistet sind.

3.1

kombinierter Stoß^{N2)}

erzeugt von einem Hybridgenerator, der eine Leerlauf-Stoßspannung von 1,2/50 und einen Kurzschluss-Stoßstrom von 8/20 liefert. Die an der Überspannung-Schutzeinrichtung (ÜSE) anliegende Spannung, Stromamplitude und Stoßformen werden durch den Generator und die Impedanz der Überspannung-Schutzeinrichtung (ÜSE) bestimmt. Das Verhältnis des Scheitelwerts der Leerlauf-Spannung zum Scheitelwert des Kurzschlussstroms beträgt 2Ω . Dies wird als die fiktive Impedanz Z_f definiert. Der Kurzschlussstrom wird mit I_{SC} bezeichnet. U_{OC} ist die Leerlaufspannung des Generators.

ANMERKUNG Im Rahmen dieses Technischen Berichts kann der kombinierte Stoß erzeugt von einem Hybridgenerator in Übereinstimmung mit der Definition 3.24 in IEC 61643-1 auch für andere Betriebsmittel als Überspannung-Schutzeinrichtungen (ÜSE) angewandt werden.

3.2

kombinierte Multi-Port-Überspannung-Schutzeinrichtung (ÜSE)

Überspannung-Schutzeinrichtung (ÜSE), die in einem einzelnen Paket Mittel enthält, um für zwei oder mehr Ports (Eingänge) von Geräten den Schutz bei Überspannung zu gewähren, die mit den Systemen verbunden sind, wie einem Niederspannungssystem und einem Fernmelde- und informationstechnischen System

ANMERKUNG Zusätzlich zur Erzielung des Schutzes bei Überspannung für jeden Port kann die Überspannung-Schutzeinrichtung (ÜSE) auch noch Mittel bereitstellen, die das Verschieben von Referenzpotentialen zwischen den Geräteports verhindern.

3.3

Koordination von Überspannung-Schutzeinrichtungen (ÜSE) (Kaskade)

Auswahl der Kenngrößen von zwei oder mehr Überspannung-Schutzeinrichtungen (ÜSE), die entlang des gleichen Leiters eines Systems angeschlossen sind, aber durch eine Entkopplungsimpedanz so voneinander getrennt sind, dass bei vorgegebenen Impedanz- und Stoßparametern diese Auswahl sicherstellt, dass die Energie, die in jeder Überspannung-Schutzeinrichtung (ÜSE) umgesetzt wird, im Einklang mit seinen Bemessungsdaten steht

3.4

direkter Teilblitz

Teilblitz, der auf die betreffende Konstruktion direkt einwirkt

3.5

Äquipotentialausgleich

Bereitstellung von elektrischen Verbindungen zwischen leitenden Teilen in der Absicht, einen Potentialausgleich zu erzielen

ANMERKUNG In typischen Anlagen wird der Potentialausgleich zur Sicherheit bei der Netzfrequenz errichtet. Bei Frequenzen von Impulsströmen treten auf Grund der Länge der Ausgleichsleiter zwangsläufig gewisse Potentialunterschiede auf.

3.6

Einrichtung

körperliche Einheit (wie beispielsweise ein Krankenhaus, eine Fabrik, Maschinen usw.), die errichtet, konstruiert, angebracht oder eingerichtet wurde, um eine spezielle Funktion zu erfüllen oder um einem bestimmten Zweck zu dienen oder zu erleichtern

^{N2)} Nationale Fußnote: Die Bezeichnungen 1,2/50 und 8/20 geben das Verhältnis scheinbare Stirnzeit/scheinbare Rückenhalbwertzeit jeweils in μs an; siehe [DIN EN 61180-1 \(VDE 0432-10\)](#).

3.7

Erdblitz

elektrische Entladung atmosphärischen Ursprungs zwischen Wolke und Erde, bestehend aus einem oder mehreren Teilblitzen

ANMERKUNG Für die Anwendung dieses Technischen Berichts kann unter einem Erdblitz nicht nur die Erde (Erdboden), sondern auch ein Blitz in ein Gebäude oder ein Netzsystem verstanden werden, im Gegensatz zu einem Wolke-Wolke-Blitz.

3.8

Blitzschutzsystem (LPS)

gesamtes System für den Schutz eines Volumens gegen die Auswirkungen des Blitzes. Es besteht sowohl aus dem äußeren Blitzschutzsystem als auch aus dem inneren Blitzschutzsystem.

ANMERKUNG In besonderen Fällen kann das Blitzschutzsystem (LPS) nur aus dem äußeren Blitzschutzsystem oder dem inneren Blitzschutzsystem bestehen.

3.9

naher Blitzeinschlag

Blitz, der in der Nähe des betreffenden Gebäudes einschlägt

3.10

Einschlagpunkt

Punkt, an dem ein Teilblitz die Erde, ein Gebäude oder ein Blitzschutzsystem (LPS) berührt

3.11

unbeeinflusste Überspannung

theoretische Überspannung, die auf den Leitern eines Netzversorgungssystems oder in der Verbraucheranlage auftreten würde, vor dem Überschlag der Basisisolierung oder dem Ansprechen eines spannungsbegrenzenden Gerätes

3.12

Abtrennvorrichtung einer Überspannung-Schutzeinrichtung (ÜSE)

Vorrichtung (intern oder extern), die benötigt wird, um eine Überspannung-Schutzeinrichtung (ÜSE) vom Netz zu trennen (siehe [EN 61643-11](#))

3.13

Steilheitsfaktor

Verhältnis eines Stromimpulses, definiert aus der Steigung im Stirnbereich für das Intervall zwischen 10 % und 90 % des Scheitelwerts und der Steigung für das Intervall zwischen 10 % und 30 % des Scheitelwerts

3.14

Teilblitz

einzelne elektrische Entladung in einem Erdblitz

3.15

Stoßüberspannung

zeitweilige oder kurzzeitige Spannung, die im System auf Grund von Stoßströmen auftritt, die von atmosphärischen Entladungen, Induktionserscheinungen, Schalthandlungen oder einem Fehler im System selber verursacht werden

3.16

Überspannung-Schutzeinrichtung (ÜSE)

Gerät, das dazu bestimmt ist, transiente Überspannungen zu begrenzen und Stoßströme abzuleiten. Es enthält mindestens ein nichtlineares Bauelement.

3.17

Überspannung-Referenz-Ausgleichsableiter („Surge reference equalizer“)

Gerät, das dazu verwendet wird, Betriebsmittel mit externen Systemen zu verbinden, wobei alle Leiter, die mit der geschützten Lastseite verbunden sind, körperlich und elektrisch durch ein einzelnes Gehäuse geführt werden, mit einem gemeinsamen Referenzpunkt zwischen den Eingangsports und den Ausgangsports von jedem System

ANMERKUNG Ein gemeinsamer Referenzpunkt kann innerhalb des Geräts entweder durch eine direkte Verbindung erstellt werden, oder durch ein geeignetes Gerät, wie einer Überspannung-Schutzeinrichtung (ÜSE), welches die Isolation im üblichen Betrieb aufrechterhält, aber beim Auftreten einer Überspannung in einem der beiden Systeme eine wirkliche Verbindung herstellt.

3.18**zeitweilige Überspannung (TOV)**

an einer bestimmten Stelle des Netzes auftretende, ungedämpft oder nur schwach gedämpfte schwingende Überspannung von relativ langer Dauer

ANMERKUNG Zeitweilige Überspannungen werden gewöhnlich durch Schalthandlungen oder Fehler (zum Beispiel plötzlicher Lastabwurf oder einphasige Fehler) und/oder durch Nichtlinearitäten (ferromagnetische Resonanzeffekte, Oberwellen) verursacht.

3.19**thermische Instabilität**

Vorgang, bei dem die Dauerverluste in der Überspannung-Schutzeinrichtung (ÜSE) die mögliche Wärmeabgabe des Gehäuses und der Anschlussklemmen überschreiten und damit eine Temperaturerhöhung der internen Elemente verursachen, die schließlich zum Versagen der Überspannung-Schutzeinrichtung (ÜSE) führt

4 Überspannungen in Niederspannungssystemen

Überspannungen in Niederspannungssystemen resultieren aus unterschiedlichen Ereignissen oder Mechanismen und können dabei in vier Kategorien eingeteilt werden. Der Anwendungsbereich dieses Technischen Berichts beschränkt sich auf Niederspannungssysteme, wobei das Hauptinteresse auf die ersten beiden Kategorien gelegt wird, aber es werden auch Richtlinien zur dritten, unten aufgeführten Kategorie gegeben. Eine bedeutende, vierte Kategorie von Überspannungen kann sich aus der Wechselwirkung von Niederspannungssystemen mit anderen Systemen, wie zum Beispiel Fernmelde- und informationstechnischen Systemen ergeben, so dass auch diese vierte Kategorie für den Inhalt dieses Technischen Berichts von Bedeutung ist.

a) Blitzüberspannungen

Blitzüberspannungen sind das Ergebnis aus einem direkten Blitzeinschlag oder einem nahen Blitzeinschlag in ein Niederspannungssystem, in Gebäude (mit oder ohne Blitzschutzsystem) oder in den Erdboden. Ferne Blitzeinschläge können auch Überspannungen in den Stromkreisen eines Niederspannungssystems induzieren. Diese Überspannungen sind Inhalt des [Abschnitts 5](#). Darin werden auch die Kopplungsmechanismen beschrieben.

b) Schaltüberspannungen

Schaltüberspannungen sind das Ergebnis von absichtlichen Handlungen im Niederspannungssystem, wie zum Beispiel dem Schalten von Lasten, Induktivitäten oder Kapazitäten in Übertragungs- oder Verteilernetzen durch das Energieversorgungsunternehmen, oder von Handlungen des Endverbrauchers im Niederspannungssystem. Sie können auch das Ergebnis von unbeabsichtigten Handlungen sein, wie zum Beispiel Fehler im Niederspannungssystem und deren Beseitigung. Beide Arten von Schaltüberspannungen sind Inhalt des [Abschnitts 6](#).

c) Zeitweilige Überspannungen

Zeitweilige Überspannungen treten in Niederspannungssystemen als Ergebnis eines weiten Bereichs von Netzzuständen auf, sowohl von normalen als auch anormalen Bedingungen. Beide Arten von zeitweiligen Überspannungen werden im [Abschnitt 7](#), behandelt. Deren Auftreten ist bei der Auswahl von geeigneten Überspannung-Schutzeinrichtungen (ÜSE) von Bedeutung.

d) Überspannungen auf Grund von Wechselwirkungen zwischen Systemen

Überspannungen können zwischen Systemen auftreten, wie zum Beispiel in Niederspannungs- und Fernmelde- und Informationssystemen, beim Fließen eines Stoßstroms in einem der beiden Systeme. Diese Überspannungen werden kurz im [Abschnitt 8](#) beschrieben.

Die [Abschnitte 5, 6, 7 und 8](#), auf die unter den Punkten a) bis d) im Abschnitt 4 verwiesen wird, bieten einen Überblick über diese Überspannungen und deren Ursachen, jedoch ohne eine weitergehende Diskussion über Konsequenzen, über die Notwendigkeit einer Begrenzung von Überspannungen oder über Risikobetrachtungen. Diese damit zusammenhängenden Themen werden in den darauffolgenden Abschnitten diskutiert.

5 Blitzüberspannungen

5.1 Allgemeines

Der Blitz ist ein natürliches und unvermeidbares Ereignis, das Niederspannungssysteme (sowohl Starkstromsysteme als auch Signal- und Datensysteme) durch mehrere Mechanismen beeinflusst. Die offensichtliche Wechselwirkung ist der Blitzeinschlag in ein Starkstromsystem. Aber auch andere Kopplungsmechanismen können Überspannungen erzeugen, siehe Bild 1. Um die Unterschiede zwischen den einzelnen Mechanismen besser zu verstehen, werden in diesem Unterabschnitt zuerst in einer Zusammenfassung die Grundparameter eines Teilblitzes dargestellt, der sich zwischen einer Wolke und einem Gegenstand auf dem Erdboden entlädt. Bild 2 zeigt ein Beispiel für Blitzeinschläge in ein komplexes elektrisches System, in einer typischen Ausführung.

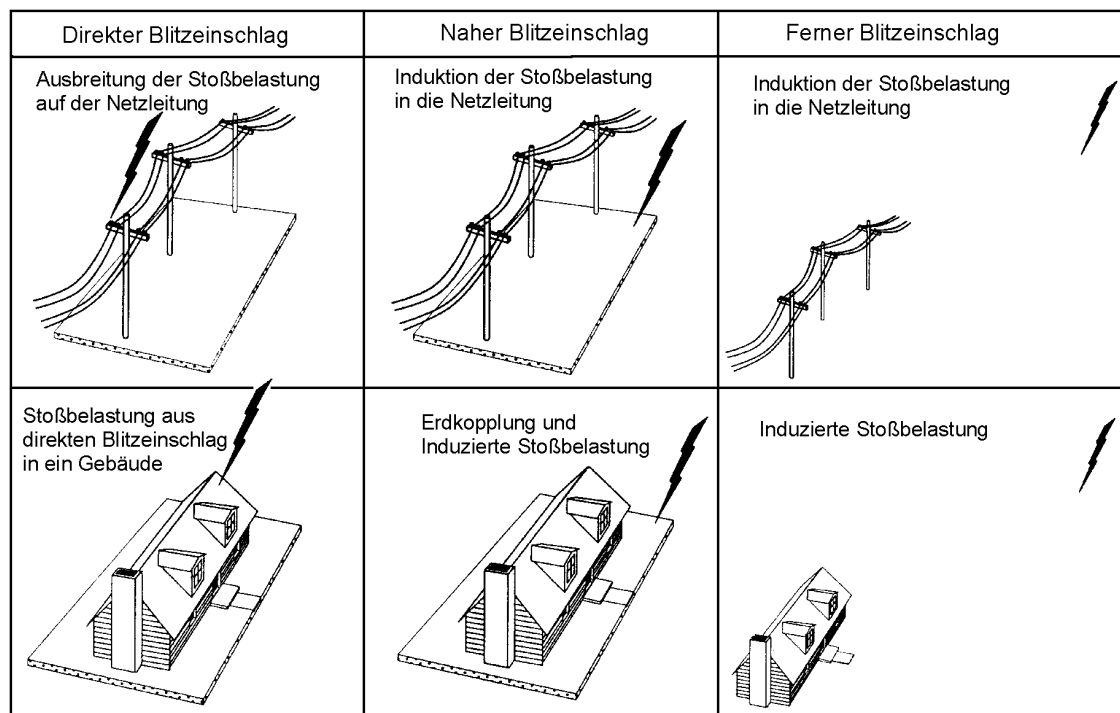


Bild 1 – Beispiele für Kopplungsmechanismen bei Blitzeinschlägen

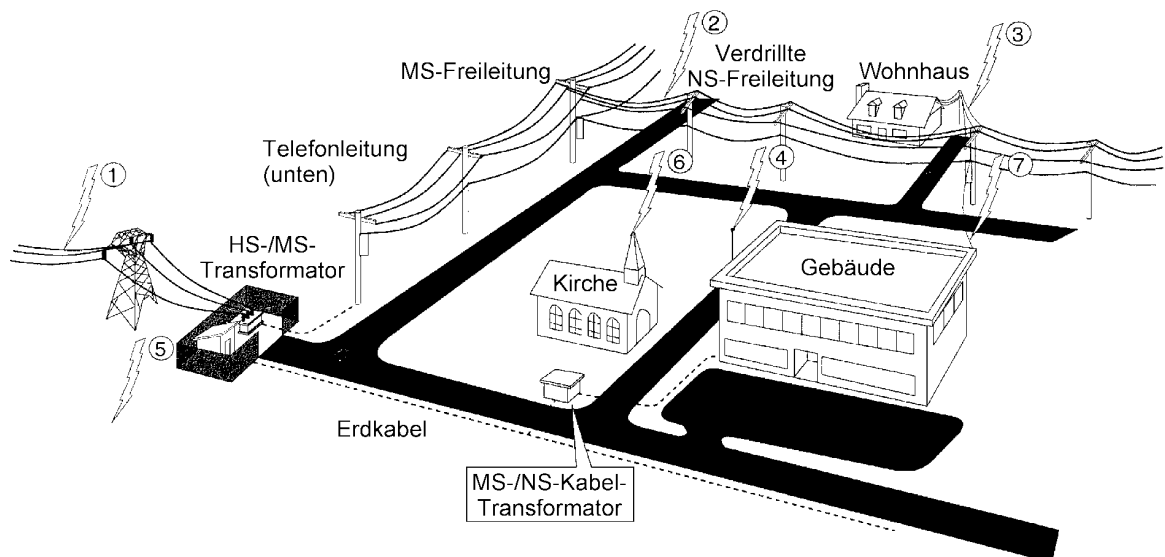
Die bedeutenden Blitzparameter enthalten die Wellenformen, die Amplituden und die Häufigkeit der Ereignisse. Die Begriffe von nahem Blitzeinschlag und fernem Blitzeinschlag beinhalten mehrere Merkmale und damit einhergehende Effekte, wie sie [Tabelle 1](#) zeigt. Die Literatur verweist sowohl auf Daten, die aus Messungen gewonnen wurden, als auch auf Daten, die durch Berechnungen ermittelt wurden. Drei Arten von Kopplungsmechanismen, die Überspannungen in Niederspannungssystemen verursachen können, werden besprochen. Während diese Diskussion auf Überspannungen verweist, ist auch die Betrachtung des Stroms, der mit der Überspannung einhergeht, oder des Stroms, der die Überspannung anfänglich überhaupt erst verursacht, ein wichtiger Punkt dieses Themas. Im Falle eines direkten Blitzeinschlags in das elektrische System ist der Blitzstrom, der durch die Erdungsimpedanzen fließt, die unmittelbare Wirkung, aus der sich Überspannungen ergeben. Die wirksame Impedanz des Blitzkanals ist hoch (einige Tausend Ohm). Dementsprechend kann der Blitzstrom praktisch als eine ideale Stromquelle betrachtet werden. Im Falle eines nahen Blitzeinschlags ist die unmittelbare Wirkung die Spannung, die in Leiterschleifen induziert wird, oder die ohmsche Kopplung, welche anschließend Stoßströme erzeugen kann. Im Falle eines fernen Blitzeinschlags beschränkt sich die Bedrohung auf induzierte Spannungen. Deshalb ist die Reaktion eines elektrischen Systems auf ein Blitzereignis ein wichtiger Gesichtspunkt bei der Abschätzung der möglichen Stoßströme und Überspannungen.

Bei einem gegebenen Blitzeinschlag spiegelt die Höhe der Überspannung, die an der Verbrauchereinrichtung auftritt, die Charakteristik des Kopplungspaths wider. Zum Beispiel können folgende Kennwerte beschrieben werden: Die Entfernung und die Art des Systems zwischen dem Einschlagpunkt und der Verbrauchereinrichtung, die Erdungspraktiken und Erdungsanschlussimpedanz, das Vorhandensein von Überspannungsschutzeinrichtungen (ÜSE) entlang des Pfads und die Verzweigung des Verteilungssystems. Alle diese Fak-

toren variieren in einem weiten Bereich, sowohl entsprechend der allgemeinen Praxis des Energieversorgungsunternehmens als auch entsprechend den örtlichen Konfigurationen.

Tabelle 1 – Eigenschaften und Einwirkungen von Blitzeinschlägen

Eigenschaften	Direkter Blitzeinschlag	Naher Blitzeinschlag	Ferner Blitzeinschlag
Mechanische Einwirkung	Bauliche Anlage		
Thermische Einwirkung	Bauliche Anlage und Stromkreise		
Energie	Überspannung-Schutzeinrichtungen (ÜSE) am Gebäudeeintritt der Niederspannungsversorgung (Hohe Beanspruchung)	Überspannung-Schutzeinrichtungen (ÜSE) am Gebäudeeintritt der Niederspannungsversorgung (Niedrige Beanspruchung)	Überspannung-Schutzeinrichtungen (ÜSE) in der elektrischen Anlage (Niedrige Beanspruchung)
Wert der Stromänderung	Angrenzende Stromkreise	Nahe gelegene Stromkreise	Stromkreise mit großen Schleifen
Anstieg des Erdpotentials	Angrenzende Stromkreise	Nahe gelegene Stromkreise	
Induktive Einkopplung	Angrenzende Stromkreise	Nahe gelegene Stromkreise	Stromkreise mit großen Schleifen
Kapazitive Einkopplung	Angrenzende Stromkreise	Nahe gelegene Stromkreise	
Ohmsche Einkopplung	Angrenzende Stromkreise	Nahe gelegene Stromkreise	
Leitungsgebunden durch Ausbreitung auf Leitungen	Überspannung-Schutzeinrichtungen (ÜSE) am Gebäudeeintritt der Niederspannungsversorgung (Hohe Beanspruchung)	Überspannung-Schutzeinrichtungen (ÜSE) am Gebäudeeintritt der Niederspannungsversorgung (Mittlere Beanspruchung)	Überspannung-Schutzeinrichtungen (ÜSE) am Gebäudeeintritt der Niederspannungsversorgung (Niedrige Beanspruchung)



Legende

- | | |
|--|---|
| 1 Direkter Blitzeinschlag in Hochspannungsleitung | 5 Blitzeinschlag in Erdreich |
| 2 Direkter Blitzeinschlag in Mittelspannungsleitung | 6 Blitzeinschlag in nahegelegenen baulichen Anlagen |
| 3 Direkter Blitzeinschlag in Niederspannungsleitung | 7 Blitzeinschlag in eine Telefonleitung |
| 4 Direkter Blitzeinschlag in Blitzschutzsystem (LPS) | |

Bild 2 – Beispiele für Blitzeinschläge in einem komplexen elektrischen System

Deshalb ist es schwierig, wenn nicht gar unmöglich, eine Erörterung zu diesem Thema vorzulegen, die allumfassend angewandt werden kann. Jedoch ist es nützlich, das Blitzereignis in einem ersten Schritt ohne das Vorhandensein von „Begrenzungsmitteln“ (Mittel, die absichtlich in einem System eingebracht werden, oder Mittel, die als im System vorhanden vorausgesetzt werden) zu betrachten. Diese erste Abschätzung des Ereignisses führt zu dem Konzept der unbeeinflussten Überspannung, welches allgemeiner anwendbar ist. Dann werden in einem folgenden Unterabschnitt im System stillschweigend vorausgesetzte Begrenzungseffekte erörtert, um zu zeigen, wie die unbeeinflusste Überspannung sich zur Verbrauchereinrichtung hin ausbreitet. Diese Ausbreitung enthält Abschwächungsmechanismen, einschließlich natürlich vorhandener Abschwächungen, herrührend von der Systemkonfiguration, und absichtlicher Begrenzungen durch Vorkehrungen mittels Überspannung-Schutzeinrichtungen (ÜSE), die durch das Energieversorgungsunternehmen oder den Endverbraucher eingebracht werden.

In den folgenden Absätzen werden zuerst die grundlegenden Blitzparameter kurz beschrieben, dann die Kopplungsmechanismen entsprechend den drei Arten, die weiter oben erörtert wurden, und schließlich wird eine Wahrscheinlichkeit der Mechanismen hergeleitet. Wolke-Erde-Blitzeinschläge treten in zwei Arten und Weisen auf, abhängig von der jeweiligen Polarität von Wolke und Erde.

Ein positiver Erdblitz besteht aus folgenden Bestandteilen:

- Dem positiven Impulsstrom und möglicherweise,
- dem positiven Langzeitstrom.

Ein negativer Erdblitz besteht aus folgenden Bestandteilen:

- Dem negativen Impulsstrom des ersten Stoßstroms und möglicherweise,
- dem negativen Impulsstrom des Folgestoßstroms und möglicherweise,
- dem negativen Langzeitstrom.

Objekte von eingeschränkter Höhe sind positiven und negativen Erdblitzten ausgesetzt. Bild 3 zeigt die dazugehörigen, möglichen Wellenformen der Blitzströme.

Objekte mit einer beträchtlichen Höhe, wie zum Beispiel Türme, die höher sind als 100 m, sind ebenfalls positiven und negativen Erdblitzten ausgesetzt. In diesem Fall kann die Entladung auch durch einen Langzeitstrom eingeleitet werden. Das Auftreten eines einzelnen Langzeitstroms ist ebenfalls möglich.

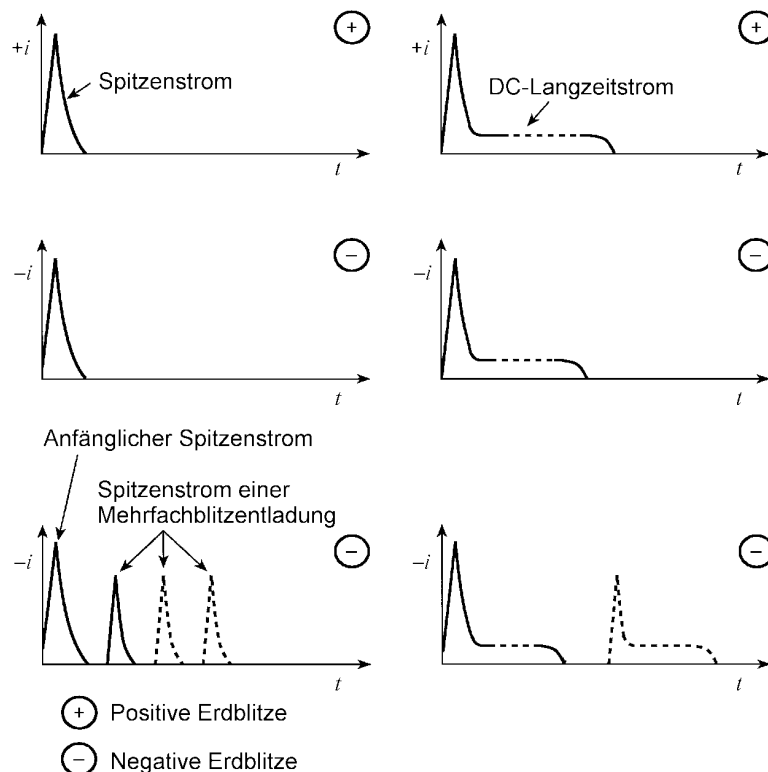
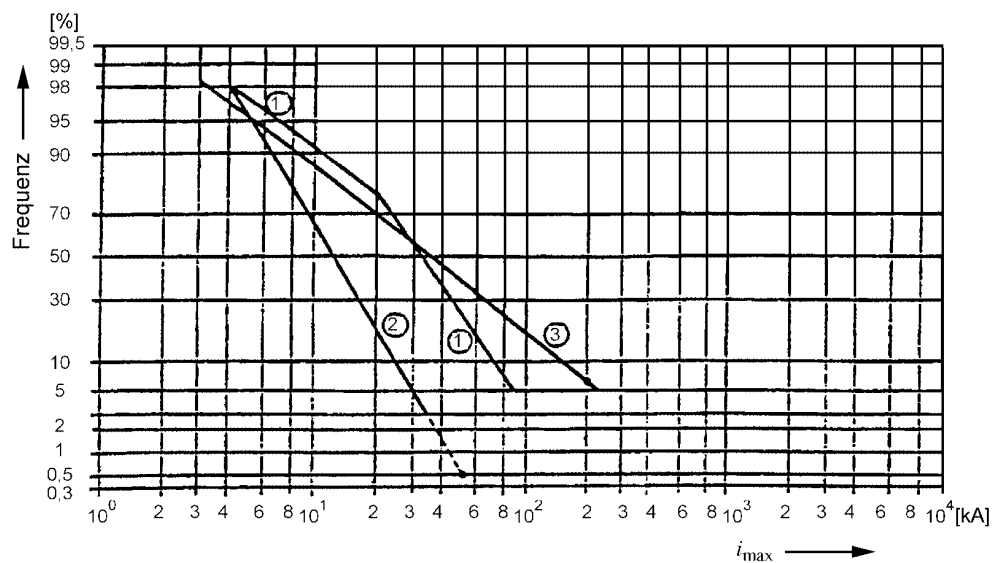


Bild 3 – Mögliche Wellenformen von Blitzströmen bei einem Einschlag in Objekte, die sich am Erdboden befinden

Bild 4 zeigt die Amplitudendichte für drei Arten von Blitzströmen und [Tabelle 2](#) zeigt die 50-%- und 5-%-Pegel der weiteren Parameter. Im Allgemeinen sind 90 % aller Blitze von negativer Polarität. Der Anteil an positiven und negativen Blitzen verändert sich jedoch beträchtlich in unterschiedlichen klimatischen Zonen. Eine umfassendere Beschreibung dieser Parameter wird in [Anhang A](#) gegeben.



Legende

- 1 Negativer erster Blitzstrom
- 2 Negativer Folgestoßstrom
- 3 Positiver Erdblitz

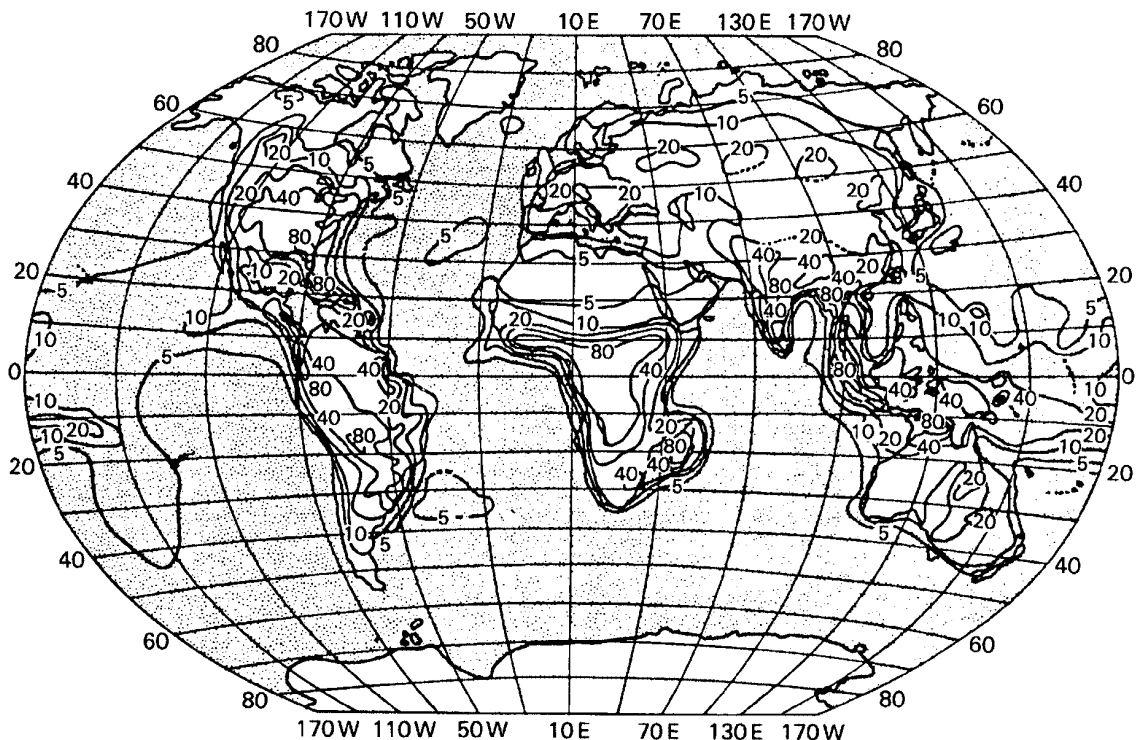
Bild 4 – Frequenzverteilung der Spitzenströme für drei Arten von Blitzereignissen

Tabelle 2 – Statistik der signifikanten Parameter eines Blitzereignisses

Blitzstromparameter	Perzentile	
	50 %	5 %
Stromscheitelwert (kA)		
Negative erste Stoßströme	20	90
Negative Folgestoßströme	12	29
Positive Erdblitz	35	250
Gesamtladung (C)		
Negative Erdblitz	8	40
Positive Erdblitz	80	350
Transiente Ladung (C)		
Negative erste Stoßströme	5	20
Negative Folgestoßströme	1	4
Positive Erdblitz	16	150
Spezifische Energie (kJ/Ω)		
Negative erste Stoßströme	55	550
Negative Folgestoßströme	6	52
Positive Erdblitz	650	15 000
Maximale Steilheit des transienten Stroms (kA/μs)		
Negative erste Stoßströme	24	65
Negative Folgestoßströme	40	162
Positive Erdblitz	2	32

Der Scheitelwert eines Blitzstoßstroms ist der entscheidende Parameter für den Spannungsfall, der an der Impedanz eines Erders oder sonstigen Objekts auftritt, und folglich für die Potentialdifferenz zwischen dem Objekt und seiner Umgebung verantwortlich. Die Ladung, die durch den Stoßstrom und den Langzeitstrom transportiert wird, ist der entscheidende Parameter für Abbrandschäden an Metallen, verursacht durch Lichtbögen des Blitzstroms. Die spezifische Energie ist der entscheidende Parameter sowohl für die Erwärmung von blitzstromführenden Leitern als auch für die mechanischen Wirkungen von elektromagnetischen Kräften. Der Blitzstromanstieg ist der entscheidende Parameter für die Spannungen und die daraus resultierenden Ströme, die in Leiterschleifen induziert werden, die sich in der Nähe eines Teilblitzes befinden. Die Mehrfach-Teilblitz-Entladung ist die Hauptursache für Störungen von Digitalsystemen auf Grund des Auftretens von scheinbaren Signalen herrührend aus einem einzelnen Blitzereignis und auf Grund der höheren Stromsteilheit von Folgeblitzen.

Bild 5 zeigt die weltweite jährliche Häufigkeit von Gewittertagen. Diese Information wird nun für Regionen, in denen Blitzortungssysteme im Einsatz sind, immer mehr abgelöst durch Blitzdichte-Landkarten. Diese Blitzdichte-Karten stellen genauere Informationen zur Verfügung als die herkömmlichen Gewittertage-Karten. Es wird erwartet, dass diese Blitzdichte-Landkarten die Gewitterlandkarten ersetzen, sobald sie zur Verfügung stehen.

Bild 5 – Karte der jährlichen Gewittertage [7] ^{1) N3)}

5.2 Ursprung von Blitzüberspannungen

Blitzüberspannungen in elektrischen Systemen können auf Grund ihres Ursprungs folgendermaßen klassifiziert werden:

- Überspannungen auf Grund von direkten Blitzeinschlägen in Freileitungen;
- induzierte Überspannungen in Freileitungen auf Grund von Blitzeinschlägen in einiger Entfernung;
- Überspannungen auf Grund von ohmscher, induktiver oder kapazitiver Einkopplung aus anderen Systemen, die Blitzströme führen.

5.2.1 Direkte Blitzeinschläge in Freileitungen

Wie bereits früher erwähnt, ist die wirksame Impedanz eines Blitzkanals hoch und der Blitzstrom kann praktisch als ideale Stromquelle betrachtet werden. Die resultierenden Überspannungen werden deshalb durch die wirksame Impedanz bestimmt, die vom Blitzstrom durchflossen werden. Für einen Blitzeinschlag in einen Leiter einer Freileitung wird die Impedanz im ersten Augenblick durch die charakteristische Impedanz (Stoßimpedanz) der Leitung bestimmt. Diese Impedanz (Z_0) liegt gewöhnlich im Bereich von 400 Ω bis 500 Ω für einen einzelnen Leiter. Wie Bild 6 zeigt, teilt sich der Strom (I) anfänglich in zwei Teile, etwa die Hälfte in jede Richtung.

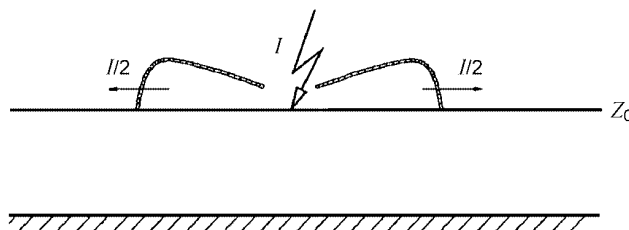


Bild 6 – Direkter Blitzeinschlag in eine Freileitung

¹⁾ Angaben in eckigen Klammern beziehen sich auf die Literaturhinweise.

^{N3)} Nationale Fußnote: Für Deutschland ist die mittlere Anzahl der Tage mit Gewitter/Jahr in DIN VDE 0100-443 (VDE 0100-443):2002-01, Anhang NC dargestellt.

Die Überspannungen (U), die am Einschlagpunkt durch den Strom erzeugt werden, sind definiert durch:

$$U = Z_0 \times I / 2 \quad (1)$$

Dabei ist

U die Überspannung in V;

Z_0 die Stoßimpedanz in Ω ;

I der Blitzstrom in kA.

Für einen Strom von „mittlerer Stärke“, mit 20 kA und einer Stoßimpedanz von 400 Ω , beträgt die unbeeinflusste Überspannung am Einschlagpunkt 4 000 kV. Auf Mittelspannungs- (MV)²⁾ und Niederspannungsleitungen wird es deshalb üblicherweise zu Überschlägen zwischen allen Netzleitern kommen und in den meisten Fällen, irgendwo entlang der Leitung, auch zu Überschlägen gegen Erde. Nach einem Überschlag reduziert sich die wirksame Impedanz insbesondere entsprechend der Höhe der betroffenen Erdungswiderstände. Jedoch selbst bei einer ziemlich niedrigen effektiven Impedanz, von zum Beispiel 10 Ω , wird bei einem Blitzstrom von 20 kA, die für dieses Beispiel zugrunde gelegt wurden, immer noch eine Spannung von 200 kV entlang der Leitung erreicht. Dabei können dann weitere Überschläge auftreten.

Die Häufigkeit von Blitzeinschlägen in Freileitungen hängt von der örtlichen Gewitterdichte ab, von der Art der Leitung (besonders der Höhe) und möglichen Schirmeffekten der Umgebung. Für Leitungen in einem offenen Gelände kann die Anzahl von Blitzeinschlägen in die Leitung abgeschätzt werden, indem man davon ausgeht, dass Blitze innerhalb einer Entfernung, die der dreifachen Leitungshöhe (H) entspricht, die Leitung treffen werden. Eine wirksame Fläche (A) aus dem Produkt $6 \times H$ und der Länge (L) kann dann entsprechend Gleichung (2) definiert werden:

$$A = 6 \times H \times L \quad (2)$$

Dabei ist

A die wirksame Fläche;

H die Höhe;

L die Leitungslänge.

Die Anzahl der Blitzeinschläge (N) pro Jahr kann dann ermittelt werden, indem man die Fläche A mit der lokalen Blitzdichte (N_g), wie nachfolgend beschrieben, multipliziert:

$$N = A \times N_g \times 10^{-6} \quad (3)$$

Dabei ist

N die Anzahl der jährlichen Blitze;

A die wirksame Fläche in m^2 ;

N_g die lokale Blitzdichte je km^2 und Jahr.

Für eine Leitung von 5 m Höhe und unter der Annahme, dass N_g gleich 1 ist, kann N mit 0,03 pro km Leitung und Jahr ermittelt werden. Dies entspricht 3 Blitzeinschlägen pro Jahr auf 100 km Leitungslänge.

5.2.2 In Freileitungen induzierte Überspannungen

Auf Grund der Änderungen des elektromagnetischen Felds, verursacht durch einen Blitzeinschlag, werden in alle Arten von Freileitungen Überspannungen induziert. Dies ist auch bei einer beachtlichen Entfernung vom Blitzeinschlagpunkt noch der Fall. Als eine grobe Näherung kann die unbeeinflusste Überspannung U (in

²⁾ In diesem Technischen Report stellt der Verteilungstransformator die Grenze zwischen dem Niederspannungssystem – weniger als 1 000 V laut IEC-Definition – und der Primärspannung dar. Die letztgenannte wird, ungeachtet ihrer Höhe, als Mittelspannung bezeichnet, trotz der üblichen Unterscheidung zwischen Hoch- und Mittelspannung.

Kilovolt) zwischen den Freileitungsleitern und Erde, wie in [53] und in [16]³⁾ aufgezeigt, wie folgt abgeschätzt werden:

$$U = 30 \times (H/d) \times I \quad (4)$$

Dabei ist

I der Blitzstrom in kA;

H die Höhe der Leiter über der Erde in m;

d die Entfernung vom Blitzereignis in m.

Die Spannungen weisen für alle Leiter im Wesentlichen den selben Wert auf, da der Abstand der Phasenleiter gering ist, verglichen mit der Entfernung zum Blitzereignis.

Als Beispiel kann eine Hochspannungsleitung mit einer Leiterhöhe von 10 m über Erdoberfläche betrachtet werden. Für einen Blitzstrom von 30 kA liegt die induzierte Spannung, bei einem Blitzereignis in 100 m Entfernung, in einer Größenordnung von 100 kV. In einer Niederspannungsleitung mit einer Höhe von nur 5 m über Erdoberfläche wird ein Blitzstrom von 100 kA, selbst bei einer Entfernung von 10 km, noch eine unbeeinflusste Spannung von 1,8 kV erzeugen.

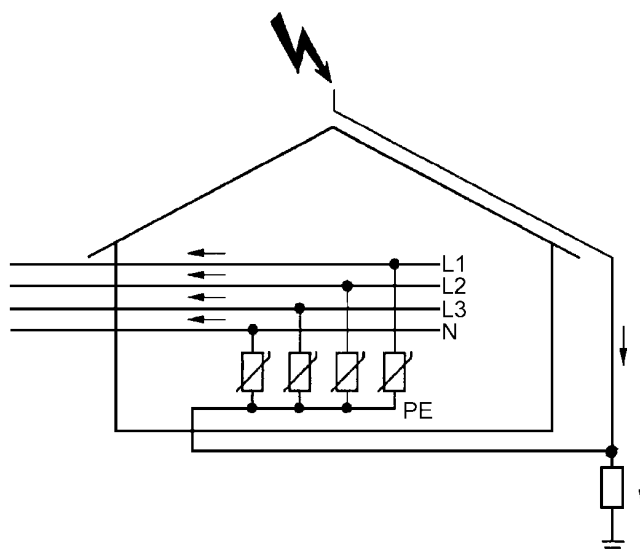
5.2.3 Überspannungen, verursacht durch die Einkopplung aus anderen Systemen

Ein Erdbezug kann an der Einschlagstelle (und in deren Nähe) ein hohes Erdoberpotential zur Folge haben. Dieses Phänomen verursacht in elektrischen Systemen Überspannungen, die diesen Erdoberpunkt als Referenzpunkt für ihr Erdoberungssystem nutzen.

Bild 7 zeigt ein Beispiel für einen solchen Fall. Die Potentialanhebung des Erdoberungssystems wird durch den Blitzstrom und die wirksame Erdoberungsimpedanz bestimmt. Zuerst wird das Potential des Erdoberwiderstands von der örtlichen Impedanz bestimmt, dies können zum Beispiel 10 Ω sein. Das bedeutet, dass zwischen dem Erdoberungssystem und der elektrischen Anlage im Gebäude eine hohe Spannung erzeugt wird. Mit hoher Wahrscheinlichkeit wird dabei entweder die Isolierung durchschlagen, oder es sprechen Überspannungsschutzeinrichtungen (ÜSE) an. Im Anschluss an solche Ereignisse können Stromimpulse in die Systeme fließen, die hauptsächlich durch deren Impedanz gegen Erde bestimmt werden. Auf diese Weise werden im Niederspannungssystem, genau wie in anderen Systemen (Fernmelde- und informationstechnischen Systemen usw.) Überspannungen erzeugt. Darüber hinaus werden Überspannungen in andere Gebäude und Anlagen übertragen. Zum Beispiel können alle Niederspannungssysteme beeinflusst werden, die vom selben Verteilungstransformator versorgt werden, wenn dieser Transformator von einem Blitz getroffen wird.

Auf Grund des hohen elektromagnetischen Felds von Blitzströmen kann auch die induktive oder kapazitive Einkopplung in elektrischen Systemen, die sich nahe am Blitzstrompfad befinden, Überspannungen verursachen. Solche Überspannungen sind ebenfalls zu beachten. Besonders in Elektronik- und Datensystemen verursachen sie Ausfälle und/oder Fehlfunktionen.

³⁾ In diesem Technischen Report stellt der Verteilungstransformator die Grenze zwischen dem Niederspannungssystem – weniger als 1 000 V laut IEC-Definition – und der Primärspannung dar. Die letztgenannte wird, ungeachtet ihrer Höhe, als Mittelspannung bezeichnet, trotz der üblichen Unterscheidung zwischen Hoch- und Mittelspannung.

Bild 7 – Beispiel für die ohmsche Kopplung von einer Blitzschutzanlage^{N4)}

5.3 Blitzüberspannungen, übertragen aus Mittelspannungssystemen

Weil ihre baulichen Anlagen höher und länger sind als andere bauliche Anlagen in ihrer Nähe (Häuser, Bäume), sind Mittelspannungssysteme im Allgemeinen Blitzen mehr ausgesetzt als Niederspannungsleitungen. Die Anzahl der Blitze, die eine Leitung beeinflussen, ist abhängig vom keraunischen Pegel des örtlichen Gebiets. Die Ausbreitung der Überspannung durch das Mittelspannungssystem und der Anteil der Überspannungen, die in das Niederspannungssystem übertragen werden, hängt vom physikalischen Aufbau des Netzes ab. Einige gravierende Unterschiede können zwischen den Ausführungen, angewendet in verschiedenen Ländern, bestehen.

Blitzüberspannungen in Mittelspannungssystemen entstehen durch direkte Blitzeinschläge oder werden wie in 5.2 beschrieben durch nahe Blitze induziert. Zusätzlich können Rück-Überschläge durch Blitzeinschläge in Erdleitungen oder fremden leitfähigen Metallteilen von Anlagen und Gebäuden oder durch Blitzeinschläge in der Nähe von Leitungsstrukturen verursacht werden.

5.3.1 Intensität von Überspannungen und deren Ausbreitung in Mittelspannungssystemen

Die Ausbreitung von Überspannungen hängt vom Aufbau des Mittelspannungssystems und besonders von den verwendeten Überspannung-Schutzeinrichtungen (ÜSE) ab. Blitzüberspannungen von großer Höhe werden im Allgemeinen während ihrer Ausbreitung entlang der Leitung sehr schnell durch Leitungsverluste und Überschläge an den Leitungsisolatoren bedämpft. Mit Ausnahme von Blitzeinschlägen direkt in den Mittelspannungs-/Niederspannungstransformator oder in dessen unmittelbarer Nähe, kann angenommen werden, dass Überspannungen in einem Mittelspannungssystem durch die Isolationsfestigkeit der Leitungssäulen begrenzt werden. In einem 20-kV-System betragen diese Überspannungen ungefähr 150 kV bis 180 kV. Bei Systemen mit Holzmasten, ohne Quer-Abzweige, können jedoch noch viel höhere Überspannungen auftreten. Eine zweite Begrenzung des Überspannungspegels erfolgt durch Überspannung-Schutzeinrichtungen (ÜSE), die üblicherweise auf der Primärseite des Mittelspannungs-/Niederspannungstransformators oder am Eingang zum Kabelnetz montiert sind. Diese Schutzgeräte können ZnO- oder SiC-Ableiter, aber auch Luftfunkenstrecken sein. Die Restüberspannung (zum Beispiel für ein 20-kV-System, im Bereich von 70 kV) hängt von den Bemessungswerten und den Erdungsimpedanzen der Schutzgeräte ab. Wenn Luftfunkenstrecken verwendet werden, ist es möglich, dass der Blitzüberspannung ein netzfrequenter Folgestrom folgen kann, der dann wiederum eine zeitweilige Überspannung verursachen kann.

Anhang A enthält ein Beispiel von Messungen blitzbedingter Überspannungen in einem typischen 20-kV-System.

5.3.2 Übertragung von Überspannungen in ein Niederspannungssystem

Im Mittelspannungssystem erzeugte Blitzüberspannungen werden auf zwei unterschiedliche Arten in das Niederspannungs-Verteilungs-System übertragen:

^{N4)} Nationale Fußnote: Die Außenleiter werden üblicherweise mit L1, L2, L3 bezeichnet.

- Durch kapazitive und magnetische Einkopplung über den Mittelspannungs-/Niederspannungstransformator;
- durch Einkopplung über die Erde.

Die Höhe der übertragenen Überspannung hängt von vielen Parametern ab, wie:

- Dem System nach Art der Erdverbindungen für Niederspannung (TT, TN, IT);
- der Charakteristik von Niederspannungsleitungen und Niederspannungslast;
- den Einrichtungen für den Schutz bei Überspannung für Niederspannung;
- den Einkopplungsbedingungen zwischen dem Erdungssystem für Mittelspannung und Niederspannung;
- der Ausführung des Transformators.

Die Analyse der Ausbreitung und Übertragung von blitzbedingten Überspannungen in Niederspannungssystemen kann durch die Verwendung eines Hochfrequenzmodells erfolgen. Prinzipiell bildet solch ein Modell den Transformator durch seine kapazitive Kopplung nach. Bei der Betrachtung von Frequenzen in den Bereich von einigen Megahertz kann dies als seine wichtigste Kenngröße angesehen werden (siehe [Anhang A](#)).

Im Falle eines direkten Blitzeinschlags in die Mittelspannungsleitung leitet das Ansprechen einer Überspannung-Schutzeinrichtung (ÜSE) oder der Überschlag eines Isolators den Stoßstrom durch das Erdungssystem ab und kann so eine ohmsche Erdkopplung zwischen dem Mittelspannungs- und Niederspannungssystem erzeugen. Wie der typische Fall in Bild 8a zeigt, wird dabei eine Überspannung in das Niederspannungssystem übertragen. Abhängig von den Werten der Erdungsimpedanzen kann die Überspannung durch die Erdkopplung viel höher sein als die Überspannung durch die kapazitive Einkopplung über den Transformator. Andererseits kann durch die Trennung der Erde, wie in Bild 8b dargestellt, diese Überspannung reduziert werden. Jedoch verursacht diese Ausführung eine Spannungsbelastung zwischen dem Transformatorgehäuse und der Sekundärwicklung des Transformators.

In einem TN-System, in dem der Neutraleiter auch an der Verbrauchieranlage geerdet ist, treten geringere Überspannungen auf. Es sollte auch hier beachtet werden, dass diese Art der ohmschen Einkopplung auch durch die Verwendung eines getrennten Erdungssystems für den Niederspannungsteil des Transformators vermieden werden könnte.

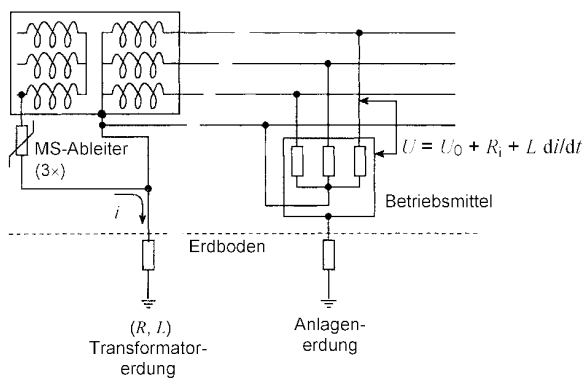


Bild 8a

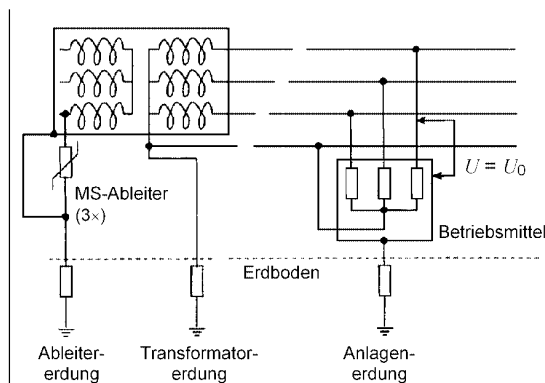


Bild 8b

Bild 8 – Typische Erdkopplungs-Mechanismen

Typische Werte für Überspannungen, die durch kapazitive oder elektromagnetische Einkopplung auf die Sekundärseite des Mittelspannungs-/Niederspannungstransformators übertragen werden, liegen bei etwa 2 % der Mittelspannungs-Leiter-Erde-Spannung zwischen Phasen- und Neutraleiter und etwa 8 % zwischen Phasenleiter und Erde. Diese Werte sind typische Werte für belastete Niederspannungskreise. Wenn die Niederspannungsseite des Transformators im Leerlauf betrieben wird oder nur sehr gering belastet ist, dann können diese Überspannungen erheblich höhere Werte erreichen, abhängig vom Niederspannungssystem.

In das Mittelspannungssystem induzierte Blitzüberspannungen erzeugen viel geringere Stoßströme (üblicherweise weniger als 1 kA) als direkte Blitzeinschläge, und die Überspannungen werden in der Praxis nur durch kapazitive Kopplung in das Niederspannungssystem übertragen. Diese Überspannungen überschreiten einige wenige Kilovolt nicht. In solchen Fällen ist die Überspannung, die direkt in das Niederspannungssystem induziert wird, im Allgemeinen höher als die Überspannung, die aus dem Mittelspannungssystem übertragen wird (zumindest in dem Teil des Netzes, der nicht weit von der Blitzeinschlagsstelle entfernt

ist). Wenn eine Überspannung-Schutzeinrichtung (ÜSE) anspricht oder wenn ein Überschlag auftritt, wird der auftretende Strom klein und dementsprechend die ohmsche Kopplung vernachlässigbar sein.

5.4 Überspannungen, verursacht durch einen Direkteinschlag in Niederspannungsleitungen

5.4.1 Unbeeinflusste (prospektive) Überspannungen

Wie in 5.2 und in den anschaulichen Beispielen des [Anhangs A](#) gezeigt wird, werden bei direkten Blitzeinschlägen in Freileitungen extrem hohe Überspannungen erzeugt. Sie haben Überschläge zwischen allen Netzleitungen und in den meisten Fällen, in der Nähe des Blitzes, Überschläge gegen Erde zur Folge (in erster Linie an den Masten). Überschläge können auch in nicht geschützten Anlagen auftreten, die von dieser Leitung versorgt werden.

In einem kombinierten System aus Freileitungen und Kabelnetz werden die Überspannungen auf Grund der niedrigeren Stoßimpedanz von Kabeln gegenüber Freileitungen nur wenig verringert. Die Höhe dieser Minderung hängt von der Stromflussdauer und der gesamten Erdkapazität des Systems ab. Jedoch ist im Allgemeinen diese Reduzierung nicht ausreichend, um Überspannungen zu vermeiden, die die Bemessungswerte der Isolation in Niederspannungsanlagen überschreiten. Deshalb muss im Allgemeinen davon ausgegangen werden, dass direkte Blitzeinschläge in Niederspannungsleitungen Schäden verursachen.

5.4.2 Praktische Begrenzungen

In der Praxis werden die Überspannungen durch Überspannung-Schutzeinrichtungen (ÜSE) begrenzt, die am Verteilungstransformator oder im Betriebsbereich des Verbrauchers angeordnet sein können. Jedoch werden solche Geräte sehr stark beansprucht und es besteht ein hohes Risiko, dass Überspannung-Schutzeinrichtungen (ÜSE) im Falle eines Direkteinschlags beschädigt werden, es sei denn die Überspannung-Schutzeinrichtungen (ÜSE) wurden speziell für diesen Zweck konstruiert.

5.5 In Niederspannungssysteme induzierte Blitzüberspannungen

5.5.1 Unbeeinflusste Überspannungen

Abschätzungen von unbeeinflussten induzierten Überspannungen in Niederspannungssystemen auf Grund von Blitzeinschlägen in einer entfernten Freileitung können aus der einfachen Formel (4) hergeleitet werden, die in 5.2.2 bestimmt wurde. Entsprechend dieser Formel können, selbst bei Blitzeinschlägen in 10 km Entfernung von einer Leitung, Überspannungen auftreten, die die normale Niederspannungs-Isolationsfestigkeit überschreiten.

Deshalb gilt dieser Art von Überspannungen das primäre Interesse bei Niederspannungs-Verteilungsnetzen, die Freileitungen enthalten. Durch Blitzeinschläge induzierte Überspannungen treten hauptsächlich zwischen den Leitern und Erde auf. Die Spannungsdifferenz zwischen den Leitern ist am Anfang klein, besonders wenn verdrehte Leiter benutzt werden. Auf Grund unterschiedlicher Lasten der einzelnen Phasenleiter (abhängig vom Niederspannungs-System), Wechselwirkungen von Überspannung-Schutzeinrichtungen (ÜSE), möglichen Überschlägen usw. können jedoch auch beachtliche Leiter-Leiter-Beanspruchungen auftreten.

[Bild 9](#) gibt ein Beispiel, das induzierte Überspannungen in Niederspannungssystemen veranschaulicht. Es wurden dabei verdrehte Leiter (einschließlich dem Neutraleiter) vorausgesetzt. Darüber hinaus ist der Neutraleiter an beiden Enden der Leitung geerdet. Es ist zu sehen, dass die Spannungen gedämpfte Schwingungen mit einer Frequenz aufweisen, die der Kennfrequenz der Leitung entspricht.

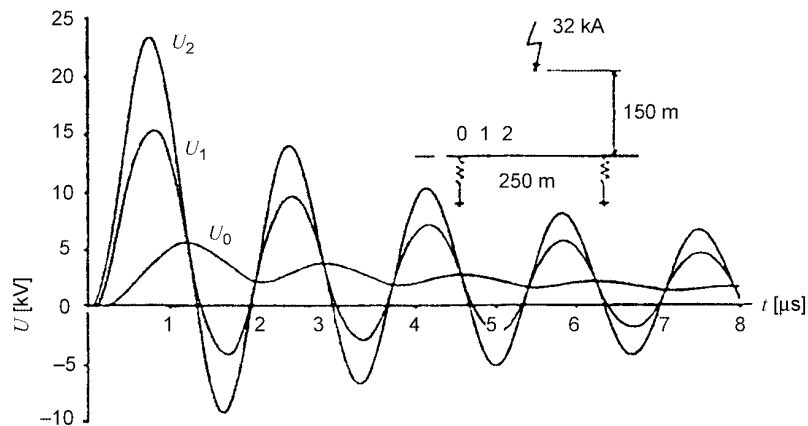


Bild 9 – Typische Überspannungen auf einer NS-Leitung – Induziert auf Grund eines Naheinschlags

5.5.2 Wahrscheinlichkeitsabschätzung von Ereignissen

Die Abschätzung der Anzahl von induzierten Überspannungen in einer Niederspannungsleitung, als Funktion der Amplitude, kann auf der Basis der weiter oben bereits zitierten einfachen Formel (4) von Rusck erfolgen. Eine solche Simulation wurde für eine Leitung von 5 m Höhe und 1 km Länge durchgeführt [29]. Es wurde dabei eine normierte Blitzdichte (N_g) von 1 Blitz pro km² und Jahr und die von CIGRÉ [10] vorgeschlagene Blitzstromverteilung zu Grunde gelegt. Ähnliche Ergebnisse, die auf dem gleichen Modell basieren und über 8 Jahre hinweg durch experimentelle Daten von Niederspannungsleitungen gestützt wurden, sind von Poplansky erzielt worden [51].

Ein anderes Verfahren folgte durch die CIGRÉ-CIRED JWG 05 (CC05), das ausgehend von in Südafrika durch Eriksson durchgeführten Versuchsmessungen [18] und mit der Entwicklung einer prinzipiellen Formel zu den gleichen Ergebnissen gekommen ist:

$$N_i = 1,9 \times 10^{-6} \times N_g \times H \times L \left[3,5 + 2,5 \log \frac{30(1-c)}{U} \right]^{3,75} \quad (5)$$

In dieser Formel steht N_i für die Anzahl der induzierten Überspannungen; N_g , H , L und U sind bereits in den Gleichungen (2), (3) und (4) definiert worden, und c ist ein Faktor, der die Reduzierungseffekte durch einen geerdeten Neutralleiter oder einen Erdleiter berücksichtigt (der Faktor c kann dabei schwanken zwischen Null in Abwesenheit eines solchen Leiters und 0,7 oder gar 0,9 im Falle eines mehrfach-geerdeten Neutralleiters in einem vorgefertigtem Leiterbündel). Obwohl die obige Formel für Mittelspannungsleitungen aufgestellt wurde, ist sie durch Simulationen, basierend auf dem Model von CIGRÉ TF 33.01.01 [46], bestätigt worden.

In Italien durchgeführte Simulationen [45] haben die wichtige Rolle eines mehrfach-geerdeten Neutralleiters bestätigt, wie dies in der Formel (5) bereits vorgeschlagen wurde. Insbesondere wird gezeigt, dass N_i auch proportional ist zum Quadrat der Entfernung zweier Erdungspunkte des Neutralleiters. Es wurde auch nachgewiesen, dass die zu erwartenden Überspannungen desto geringer waren, je näher zum Erdanschluss die Messungen durchgeführt wurden.

Bild 10 zeigt den Vergleich der Kurven, die aus den Simulationen von Johannesen und den Simulationen von CC05 (unter der Annahme von $c = 0$) gewonnen wurden. Weitere Ergebnisse, die durch Electricité de France mit dem ANASTASIA-Code [52] errechnet wurden und im **Bild A.4** vorgestellt werden, sind in diesem Bild ebenfalls enthalten. Um einen gültigen Vergleich zu erhalten, sind alle Messwerte auf eine Leitung von 1 km Länge und 10 m Höh, mit $N_g = 1$ normiert worden (unter der Annahme, dass N_i proportional ist zu N_g , H und L). Jedoch sollte angemerkt werden, dass für die Simulationen etwas unterschiedliche Annahmen getroffen wurden. Zum Beispiel wurde für die ANASTASIA-Simulationen, die Leitung an einem Ende durch einen Mittelspannungs-/Niederspannungstransformator abgeschlossen und das andere Ende im Leerlauf betrieben. Bei den Simulationen von Johannesen [29] war die Leitung mit angepassten Impedanzen abgeschlossen (keine Reflexionen) und nur Blitze entlang der Seiten der Leitung wurden berücksichtigt. Deshalb ist ein direkter Vergleich der Kurven schwierig. Die Ergebnisse dürfen jedoch als allgemeiner Hinweis für die zu erwartende Größenordnung von durch Blitze induzierten Überspannungen angesehen werden.

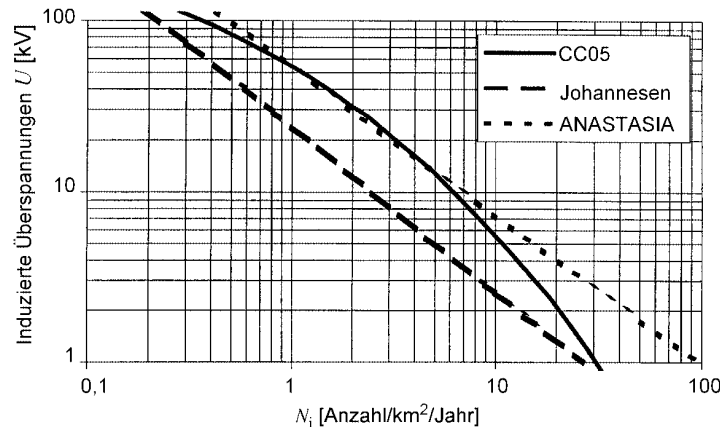


Bild 10 – Beispiel für eine abgeschätzte Häufigkeit von unbeeinflussten (prospektiven), induzierten Blitzüberspannungen auf NS-Freileitungen

Diese Verteilungen stellen die unbeeinflussten Überspannungen dar (nicht beeinflusst durch irgendeine Reaktion des Systems, wie zum Beispiel einen Überschlag). In praktischen Fällen treten Verzerrungen und Begrenzungen durch Mehrfach-Verzweigungen, Kabelabschnitte, Lasten, Überschlüge, Überspannung-Schutzeinrichtungen (ÜSE) usw. auf. Es ist deshalb zu erwarten, dass die statistischen Verteilungen in diesem Bild in realen Fällen etwas unterscheiden. Insbesondere die Häufigkeit von Überspannungen mit Höhen, die die Festigkeit der üblichen Leitungsisolierung übersteigen, wird dabei geringer sein.

5.6 Beispiele von induzierten Überspannungen

Auf Grund der vorausgehenden Daten über die Häufigkeit von Überspannungen könnte man mehr überspannungsbedingte Ausfälle von Geräten erwarten, als tatsächlich beobachtet werden. Dieser Widerspruch kann durch mehrere Faktoren erklärt werden: Durch die tatsächliche Wahrscheinlichkeit eines (Überspannungs-) Ereignisses an einem bestimmten Ort, durch den Abschwächungseffekt auf Grund der vielfachen Wege, die sich den Überspannungen anbieten, durch das tatsächliche Betriebsverhalten der Leitungen, durch Aufladungseffekte sowohl an linearen als auch nichtlinearen Lasten, durch die Gegenwart von Überspannung-Schutzeinrichtungen (ÜSE) auf Grund von unerkannten Überschlägen angesichts extremer Überspannungen usw.

5.6.1 Simulationen

Als ein Beispiel für zu erwartende, unbeeinflusste Überspannungen wurde eine Simulation mit einer Monte-Carlo-Statistik an einem Modell eines Niederspannungs-Verteilungssystem durchgeführt. Es wird in [Bild 11](#) dargestellt. Die Erdblitz-Dichte wurde mit 2,2 Blitzen pro km² und Jahr angenommen. Alle Lasten wurden einfach durch frequenzunabhängige Widerstände modelliert. Die Tabelle 3 zeigt die Ergebnisse dieser Analysen. Die letzte Spalte zeigt die Höchstwerte der Überspannungen, sie treten aber nur im Falle eines direkten Blitzeinschlags in das Niederspannungssystem auf. Die Wahrscheinlichkeit eines solchen Überspannungseignisses beträgt in diesem Beispiel 1 Einschlag in 22 Jahren.

Tabelle 3 – Unbeeinflusste Leiter-Erde-Überspannungspegel in Niederspannungsanlagen, Ereignisse pro Jahr

	> 1,5 kV	> 2,5 kV	> 4 kV	> 6 kV	> 20 kV
Unbelastetes TT-System	6	3	1,8	1	0,045
Belastetes TT-System	4	1,7	1	0,5	0,045
Belastetes TN-System	1	0,6	0,35	0,25	0,045

ANMERKUNG 1 Die Zahlen, die in der Tabelle gezeigt werden, ergaben sich für ein Freileitungs-Verteilungssystem mit verdrehten Kabeln. Für ein Verteilungssystem mit offenen Freileitungsleitern in Luft sind doppelt so hohe Spannungswerte bei gleicher Wahrscheinlichkeit zu erwarten.

ANMERKUNG 2 In diesem Beispiel zeigte sich, dass bei einer Variierung des Modells für ein TN-System der Wert der Erdungsimpedanz einen signifikanten Einfluss nicht hatte, weil der Niederspannungs-Neutralleiter dabei direkt mit Erde verbunden ist.

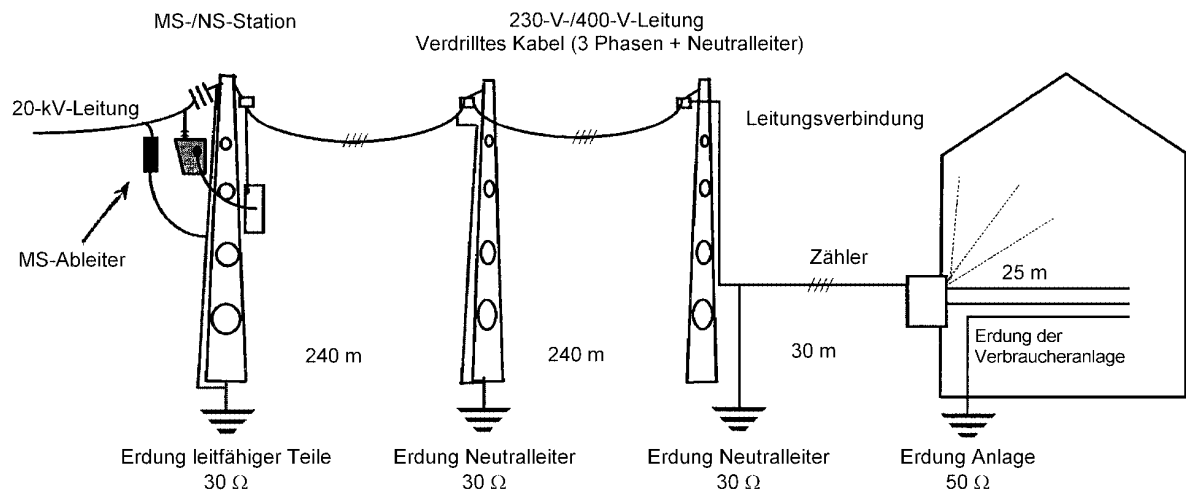


Bild 11 – Modell des für die Computersimulation verwendeten Verteilungssystems

Diese Untersuchung zeigt für die typische Niederspannungsleitung von Bild 11 und für eine Blitzdichte von 2,2 Blitzen pro Jahr und km^2 , dass die Anzahl von unbeeinflussten Überspannungen, die die Isolationswerte überschreiten, die in IEC 60664-1 definiert sind, wie zum Beispiel 4 kV für ein 230-V-TN-System, im Bereich von einem Ereignis pro Jahr liegen.

In 5.5.2 wird auf Messungen [50] verwiesen, die in Regionen mit einer ähnlichen Erdblitzdichte durchgeführt wurden (2 bis 3 Blitze pro Jahr und km^2). Diese Messungen wurden an Niederspannungsleitungen zwischen den spannungsführenden Leitern und einem örtlichen Erder, an den jeweiligen Messorten, durchgeführt. Deshalb sind diese Messwerte (die Spannungen über 4 kV ungefähr 10-mal pro Jahr zeigen) nicht direkt vergleichbar mit den Simulationsergebnissen, die in Tabelle 3 dargestellt werden. Wenn man jedoch die speziellen Parameter, die dem Simulationsstromkreis zugrunde gelegt wurden, und die Tatsache, dass hier Leiter-Erde-Spannungen innerhalb der Anlage untersucht wurden, berücksichtigt, dann zeigen die Messungen und die Simulationsergebnisse eine relativ gute Übereinstimmung.

ANMERKUNG Diese Untersuchung ist durch weitere Berechnungen mit dem ANASTASIA-Programm ergänzt worden. Es wurde dabei angenommen, dass eine Überspannung-Schutzeinrichtung (ÜSE) mit einem Schutzpegel von 2,5 kV am Gebäudeeintritt der Niederspannungsversorgung der Anlage eingebaut ist. Der Strom, der durch die Überspannung-Schutzeinrichtung (ÜSE) fließt, wurde ebenfalls berechnet. Diese Simulationsergebnisse bestätigen, dass Stoßströme, die durch Überspannungen induziert werden, im Allgemeinen kleiner als 1 kA sind. Zum Beispiel betrug der maximale Strom durch die Überspannung-Schutzeinrichtung (ÜSE) nur 60 A für den Fall eines direkten Blitzeinschlags von 100 kA in die Erde, 200 m von der Niederspannungsleitung entfernt. Es wurde auch der Strom durch die Überspannung-Schutzeinrichtung (ÜSE) berechnet, für den Fall eines direkten Blitzeinschlags von 100 kA in die Mittelspannungsleitung, die 250 m vom Mittelspannungs-/Niederspannungstransformator entfernt ist; der daraus resultierende Strom betrug in etwa 200 A. Diese beiden Ergebnisse wurden für einen angenommenen Erdungswiderstand am Gebäudeeintritt der Niederspannungsversorgung von 50 Ω ermittelt. Niedrigere Erdungswiderstände werden dazu führen, dass die Ströme durch die Überspannung-Schutzeinrichtungen (ÜSE) ansteigen.

5.6.2 Messungen

Messungen, die in Frankreich durchgeführt wurden und immer noch fortgesetzt werden, haben gezeigt, dass die unbeeinflussten Werte von Tabelle 3 nicht oft erreicht werden, weil in der Praxis die Niederspannungsleitung im Allgemeinen mit einer Vielzahl von Anlagen verbunden ist und weil Überspannung-Schutzeinrichtungen (ÜSE) ansprechen oder weil Überschläge, welche in jedem Teil des Niederspannungssystems auftreten können, die Überspannungen, die im restlichen System auftreten können, reduzieren.

Über Messungen von blitzinduzierten Überspannungen in Niederspannungsleitungen wird in [50] berichtet, für eine Gegend mit einer ähnlichen Blitzdichte, aber zwischen Außenleiter oder Neutraleiter und dem örtlichen Erder. Die Leitungslängen lagen in einer Größenordnung von etwa 1 km. Überspannungen über 4 kV traten pro Jahr etwa 8- bis 12-mal auf, abhängig von Abschirmungseffekten an der Leitung durch umgebende Objekte. Es ist zu beachten, dass diese Überspannungen zwischen den Leitungen und der örtlichen Erde auftraten und nicht über die Verbraucherlasten.

Die systematische Überwachung von Überspannungen an mehreren Standorten, die in letzter Zeit in Deutschland durchgeführt wurden, führten zu den Statistiken, die in Tabelle B.3 ausführlich vorgestellt werden. Die Ursache für die Überspannungen, ob durch Schalthandlungen oder durch Blitze verursacht, wurde

in dieser Untersuchung nicht identifiziert. Es ist möglich, dass die wenigen Aufzeichnungen am oberen Ende der Skala mit Blitzüberspannungen zusammenhängen (4 Überspannungsereignisse über 2 kV und 2 Überspannungsereignisse über 6 kV, bei einer Gesamtzahl von 151 Überspannungsereignissen über 1 kV, von wiederum 3 000 Überspannungsereignissen über 500 V).

5.7 Überspannungen, verursacht durch Blitzeinschläge in Gebäude oder in deren unmittelbarer Nähe

5.7.1 Blitzstromverteilung zwischen parallelen Anlagen

Wenn ein Blitz ein Gebäude trifft, welches eines von mehreren Gebäuden ist, die parallel von einem Niederspannungs-Energieversorgungssystem eingespeist werden, dann teilt sich der Blitzstrom, der in die Erde ⁴⁾ fließt, zwischen den verfügbaren Strompfaden auf. Diese Pfade enthalten sowohl die örtliche Erde (Gebäudeerdung) als auch Punkte der fernen Erde durch jeden einzelnen metallischen Pfad, vor allem durch das Stromversorgungskabel.

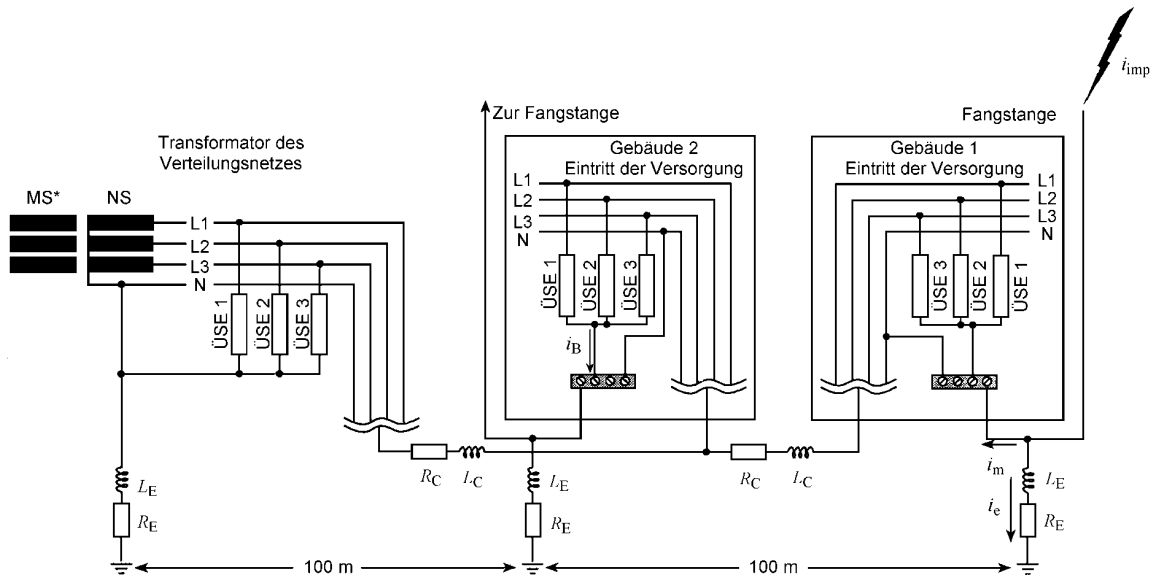
Um diese Stromverteilung zu quantifizieren, sind zwei Beispiele mit Hilfe des Programms PSPICE simuliert worden. Die Beispiele werden in [Anhang A](#) detailliert dargestellt und hier zusammengefasst. Das [Bild 12](#) zeigt zwei Gebäude, die von einer Transformatorstation gespeist werden. Gebäude 1 wird dabei von einem Blitz getroffen, wie er in IEC 61312-1 definiert ist.

Im Gebäude 1 des [Bilds 12](#) fließt der eingepreßte Strom i_{imp} von der Fangeinrichtung des Blitzschutzsystems, durch die Ableitungseinrichtung, zur Erdungsanlage. An diesem Punkt teilt sich der Blitzstrom in zwei Komponenten: i_e -Teilstrom, der in die örtliche Erde des Gebäudes fließt, und i_m -Teilstrom, der durch das Energieversorgungskabel zur fernen Erde fließt. Diese beide Ströme teilen sich auf nach dem umgekehrten Verhältnis der Impedanzen. Im Stirnbereich des Impulsstroms wird die Stromverteilung durch das Verhältnis der Induktivitäten bestimmt. Versuchsergebnisse haben dieses Verhalten bestätigt [\[14\]](#). Im Stromrücken, wo die Stromänderung geringer ist, wird die Stromaufteilung durch das Verhältnis der ohmschen Widerstände bestimmt, wie das Formel (6) zeigt:

$$i_m/i_e = R_e/R_m \quad (6)$$

Werden mehrere Gebäude elektrisch miteinander verbunden, dann verringert sich der wirksame Widerstand R_m . Das bedeutet nach Formel (6), dass der Anteil des Blitzstroms, der aus dem getroffenen Gebäude in das Niederspannungssystem fließt, zunehmen wird, wenn mehrere Gebäude mit diesem Strang verbunden sind. Für das Beispiel von [Bild 12](#) zeigt die [Tabelle 4](#) die Stromamplituden für die einzelnen Strompfade gegen Erde (nach der anfänglichen, durch die Induktivitäten dominierten Phase). Diese Werte wurden durch Computersimulationen berechnet, die detaillierter in [Anhang A](#) dargestellt werden. In diesen Berechnungen waren Anzeichen von Schwingungen durch Reflexionen nicht zu finden, weil für das Modell eine niedrige Erdungsimpedanz von 10 Ω und keine Kapazitäten vorausgesetzt wurden [\[5\]](#). Weitere Beispiele für die Stromaufteilung sind in [Anhang A](#) aufgeführt. In Fällen mit einer kürzeren Wellenform des Blitzstroms kann die Stromverteilung nicht einfach durch die alleinige Berücksichtigung der Widerstände abgeschätzt werden [\[31\]](#).

⁴⁾ Der Verlauf des Blitzstroms, bevor er sich auf die vorhandenen Strompfade aufteilt, wird oft so dargestellt, dass er von der Wolke ausgehend in die Erde fließt. Es sollte beachtet werden, dass bei einem negativen Erde-Wolke-Teilblitz ([Bild 3](#)) der Blitzstrom ein Rückstrom ist, der von der Erde ausgeht und nicht „in die Erde“ fließt, sondern es strömen vielmehr die Ladungen zur Wolke hin.



*) Die Verbindung zur Mittelspannungsseite (MS) ist nicht angegeben.

Bild 12 – Modell zur Berechnung der Blitzstromverteilung unter parallelen Gebäuden am Beispiel eines TN-C-Systems

Auf Grund der unterschiedlichen Praktiken der Neutraleiter-Erdung, die in den Ländern angewandt werden, können einige Unterschiede erwartet werden in der Art und Weise, wie sich der Blitzstrom unter den zur Verfügung stehenden Strompfaden aufteilt [31]. Aber das allgemeine Prinzip, das in diesem Beispiel dargestellt wurde, bleibt gültig. Wird der Neutraleiter an jedem Gebäude geerdet, wie das in einem TN-C-System der Fall ist, dann ist in den Neutraleiterpfaden eine Überspannung-Schutzeinrichtung (ÜSE) nicht enthalten. Dies bringt für die anderen Überspannung-Schutzeinrichtungen (ÜSE), die mit den Phasenleitern verbunden sind, eine gewisse Erleichterung. Netzentwickler sollten diese Unterschiede beachten.

Als allgemeine Schlussfolgerung kann man Folgendes feststellen: Je höher die Gebäudedichte in einer Gegend ist, desto höher ist der Anteil des Blitzstroms, der durch das ankommende Niederspannungs-Stromversorgungskabel gegen Erde abfließt. Diese Schlussfolgerung hat Auswirkungen, sowohl für das getroffene Gebäude als auch für die angrenzenden Gebäude.

Tabelle 4 – Stromverteilung zwischen den verfügbaren Strompfaden für das Beispiel in Bild 12 (10/350 μ s, 100 kA Blitzteilstrom)

Verfügbarer Pfad gegen Erde	Ungefährer Stromscheitelwert (nach der Anfangsphase) kA	Ungefähre Ladung C
Erder von Gebäude 1 (i_{Erdung})	33	16,5
Ausgehend von Gebäude 1 zu Gebäude 2		
Gesamt (i_m) über das Stromversorgungskabel	66	33
Direkt über den Neutraleiter	17	9
Durch die Überspannung-Schutzeinrichtung (ÜSE) 1	16	8
Durch die Überspannung-Schutzeinrichtung (ÜSE) 2	16	8
Durch die Überspannung-Schutzeinrichtung (ÜSE) 3	16	8
In den Erder von Gebäude 2		
Gesamt	34	16,5
Direkt über den Neutraleiter	9	4,7
Durch die Überspannung-Schutzeinrichtung (ÜSE) 1	8	4
Durch die Überspannung-Schutzeinrichtung (ÜSE) 2	8	4
Durch die Überspannung-Schutzeinrichtung (ÜSE) 3	8	4
Ausgehend von Gebäude 2 zur Transformatorstation über das Stromversorgungskabel		
Gesamt	33	16
Direkt über den Neutraleiter	9	4,5
Direkt über die Leitung 1	8	4
Direkt über die Leitung 2	8	4
Direkt über die Leitung 3	8	4

5.7.2 Überspannungen, resultierend aus der Blitzstromverteilung

Die Blitzstromverteilung zwischen den zur Verfügung stehenden Strompfaden verursacht hauptsächlich Überspannungen zwischen den Leitern und der örtlichen Erde. Abhängig von der Konfiguration der Niederspannungsanlage und dem Vorhandensein oder Nichtvorhandensein von Überspannung-Schutzeinrichtungen (ÜSE), können diese Überspannungen höher oder geringer sein. Einige Beispiele, die aus der oben beschriebenen Simulation abgeleitet worden sind, werden detaillierter in A.5 dargestellt. Dort werden zwei Beispiele für Überspannungen beschrieben, die aus einem Stoßstrom resultieren, von dem angenommen wird, dass dieser Stoßstrom am Gebäudeeintritt der Niederspannungsversorgung eingespeist wird. In diesen Beispielen wurde der Impulsstrom am Gebäudeeintritt der Niederspannungsversorgung des getroffenen Gebäudes eingepreßt. Die Überspannungen, die an ausgewählten Punkten innerhalb des Gebäudes auftreten, wurden für diesen Fall ermittelt.

Jüngst sind Versuche an einer Nachbildung einer mehrfach geerdeten Niederspannungsanlage durchgeführt worden. Dabei wurde ein getriggert Blitz an mehreren Stellen der Anlage eingekoppelt [14]. Die Ergebnisse stimmen im Wesentlichen mit den vorangegangenen Erklärungen überein. Sie zeigen die vorteilhafte Wirkung einer verbesserten Erdung des Neutraleiters am Gebäudeeintritt der Niederspannungsversorgung. Sie zeigen auch, wie wichtig es ist, dass ohmsche, induktive und wechselseitige Kopplungseffekte berücksichtigt werden.

Es sollte angemerkt werden, dass die Anhebung des Erdpotentials, resultierend aus einem direkten Blitzeinschlag in ein Gebäude oder in eine sonstige bauliche Anlage, üblicherweise die Isolationsfestigkeit der Niederspannungsanlage übersteigt. Folglich kommt es zu Überschlägen und zu Überspannungen, die sich in

angrenzende Gebäude (Anlagen) fortpflanzen, die an das gleiche Niederspannungsverteilungssystem angeschlossen sind.

Daher kann selbst bei einem Kabelnetz ein Gebäude, das nicht von einem Blitzeinschlag getroffen wird, Überspannungen ausgesetzt sein. Die Anzahl der Gebäude (Anlagen), die in diesen Ausbreitungsprozess einbezogen werden, steigt mit dem spezifischen Erdbodenwiderstand. Außerdem erhöht die Gegenwart eines hohen Gebäudes, bei einer vorgegebenen Blitzdichte in dieser Gegend, die Wahrscheinlichkeit von leitungsgebundenen Überspannungen. Dieses Phänomen kann man beobachten, obwohl sich für niedrige Gebäude, die in der Nachbarschaft eines hohen Gebäudes liegen, die Wahrscheinlichkeit eines direkten Blitzeinschlags verringert.

Überspannungen zwischen den Leitern und der lokalen Erde belasten die Isolierung der angeschlossenen Geräte. Sie haben üblicherweise, entsprechend den Empfehlungen nach **IEC 60664-1**, eine ausreichende Spannungsfestigkeit, während die Funktionsbauteile der Betriebsmittel durch Überspannungen belastet werden, die zwischen den Leitern auftreten. Auf den ersten Blick möchte man meinen, dass die bedrohlichste Situation die Arten von Überspannungen darstellen, die auf die Funktionsbauteile der Betriebsmittel einwirken. Jedoch können auch Überspannungen gegen Erde zu einem Problem werden. Dieses ergibt sich nicht so sehr für die Isolierung der Betriebsmittel. Diese Überspannung kann aber dazu führen, dass sich das Referenzpotential zwischen dem Stromversorgungssystem und dem Fernmelde- oder informationstechnischen System, das mit dem Betriebsmittel verbunden ist, verschiebt. Dieses Problem der Potentialverschiebung wird detaillierter in **Abschnitt 8** und in **Anhang D** diskutiert.

Wie oben bereits diskutiert, machen die unterschiedlich vorhandenen Praktiken der Neutralleiter-Erdung und die Bereitstellung von Überspannung-Schutzeinrichtungen (ÜSE) (wenn vorhanden) es schwierig, in der Breite anwendbare rechnerische Ergebnisse anzugeben. Vorsicht ist gegenüber ungerechtfertigten Verallgemeinerungen aus illustrativen Beispielen angebracht.

5.7.3 Häufigkeit von Ereignissen

Die jährliche Häufigkeit N_d von direkten Blitzeinschlägen in einer baulichen Anlage kann aus dem Produkt der jährlichen Dichte der Erdblitze N_g (Blitz pro km^2 und Jahr) und der wirksamen Einzugsfläche der baulichen Anlage A_e (km^2) ermittelt werden:

$$N_d = N_g \times A_e \quad (7)$$

Die wirksame Einzugsfläche der baulichen Anlage ist definiert als der Bereich der Erdoberfläche, welcher dieselbe jährliche Häufigkeit von direkten Blitzeinschlägen aufweist, wie die bauliche Anlage selbst. Sie ist eine Funktion der Maße der baulichen Anlage und abhängig von der Topographie des Bodens und den umgebenden Objekten (siehe auch IEC 61024-1).

Für ein freistehendes rechteckiges Gebäude wird A_e wie folgt ermittelt:

$$A_e = 10^{-6} (A + 3h \times p + 9\pi h^2) \quad (8)$$

Dabei ist

- A die horizontale Fläche der baulichen Anlage in m^2 ;
- h die Höhe der baulichen Anlage in m;
- p der Umfang des Dachs in m.

Abhängig von N_g beträgt die Größenordnung von N_d für ein kleines Gebäude ungefähr 10^{-2} bis 10^{-3} pro Jahr. Jedoch, wie bereits in vorhergehenden Abschnitten diskutiert, ist die Wahrscheinlichkeit, dass in Niederspannungsnetzen auf Grund von Blitzeinschlägen in entfernten Gebäuden Überspannungen auftreten, viel höher, aber solche Überspannungen weisen im Allgemeinen niedrigere Belastungswerte auf. Zum Beispiel ist man durch Simulationen, die für ein typisches Freileitungsnetz durchgeführt wurden [45], zum Schluss gekommen, dass die Anzahl von Überspannungsereignissen der letzteren Kategorie (durch Ausbreitung) in der Größenordnung von 0,1 bis 0,3 Ereignissen pro Jahr liegt.

Die Höhe der Belastung ist abhängig von der Beschaffenheit des Erdbodens, vom Netztyp (Freileitung, unterirdisches Kabelsystem) und von der Häufigkeit und Qualität der Neutralleiter-Erdung. Gesicherte Daten über den Zusammenhang von spezifischen Belastungswerten und der Häufigkeit von diesen Ereignissen gibt es nicht, aber IEC 61662 liefert zu diesem Thema einige Anhaltspunkte.

5.8 Zusammenfassung zu Blitzüberspannungen

Blitzüberspannungen gehen zurück auf eine Quelle, die außerhalb der menschlichen Kontrolle liegt. Ihre Höhe im Zusammenhang mit der Nutzung von elektrischer Energie hängt von vielen Parametern ab, die bestimmt werden durch die Einschlagstelle eines Blitzeinschlags und die Struktur des Energieversorgungssystems. Obwohl die Struktur des Energieversorgungssystems der menschlichen Kontrolle unterliegt, werden seine Parameter im Allgemeinen nach anderen Kriterien, als den Kriterien im Zusammenhang mit dem Blitzschutz, bestimmt.

Diese Überspannungen können nach ihrer Einschlagstelle wie folgt eingeteilt werden: Direkte Blitzeinschläge, nahe Blitzeinschläge und ferne Blitzeinschläge. Bei direkten Blitzeinschlägen resultieren die Überspannungen aus dem Stromfluss des Blitzstroms innerhalb der betreffenden baulichen Anlage und dem damit verbundenen Erdungssystem. Bei nahen Blitzeinschlägen resultieren die Überspannungen aus Induktionsspannungen in Leiterschleifen und, bis zu einem gewissen Maße, aus dem durch den Blitzstrom verursachten Anstieg des Erdpotentials. Bei fernen Blitzeinschlägen beschränken sich die Überspannungen auf jene Überspannungen, die in Leiterschleifen induziert werden.

Höhere Belastungen treten auf, je näher sich die Einschlagstelle des Blitzes an der betreffenden baulichen Anlage befindet. Aber die Wahrscheinlichkeit von solchen hohen Belastungen ist geringer als die Wahrscheinlichkeit von Belastungen mit geringerer Höhe, die mit entfernteren Blitzeinschlägen einhergehen. In jedem Fall sind statistische Betrachtungen, die in den Abschnitten diskutiert werden und die sich mit Risikoanalysen beschäftigen, ein wesentlicher Bestandteil bei Entscheidungen, die den Schutz gegen blitzbedingte Überspannungen betreffen.

Blitzereignisse und Blitzkennwerte sind von statistischer Natur und unterliegen deshalb immer noch gewissen Unsicherheiten. Zum Beispiel wurden die meisten direkten Blitzstrommessungen an hohen Türmen durchgeführt. Die Ergebnisse können deshalb unter Umständen nicht allgemeingültig sein. Geographische Gegebenheiten, einschließlich klimatischer Bedingungen, können ebenfalls einen entscheidenden Einfluss haben.

An mehreren Orten der Erde werden deshalb immer noch sowohl Messungen als auch theoretische Untersuchungen durchgeführt. Es sind daher für die Zukunft noch verlässlichere Informationen über Blitze und die Auswirkungen von Blitzen zu erwarten.

Es ist anzumerken, dass Erkenntnisse aus theoretischen Untersuchungen oder Ergebnisse aus begrenzten Messungen, die zur Definition der Häufigkeit von Blitzereignissen und zur Abschätzung der Stärke von Blitzüberspannungen herangezogen werden, immer durch Abgleichen mit der Realität in Einklang gebracht werden sollten, wie sie in [Abschnitt 9](#) diskutiert werden.

6 Schaltüberspannungen

6.1 Allgemeines

Allgemein kann gesagt werden, dass auf jede Schalthandlung, auf jedes Auftreten eines Fehlers, auf jede Unterbrechung eines Fehlers usw. in einer elektrischen Anlage ein transientes Phänomen folgt, in dem auch Überspannungen auftreten können. Die plötzliche Änderung innerhalb des Netzes kann gedämpfte Schwingungen von hohen Frequenzen auslösen (bestimmt durch die Resonanzfrequenzen des Netzes), bis sich das System wieder in seinem neuen stationären Zustand stabilisiert hat. Die Höhe dieser Schaltüberspannungen hängt von vielen Einflussfaktoren ab, wie der Art des elektrischen Systems, der Art von Schalthandlungen (Einschalten, Ausschalten, Wiedereinschalten), der Art der Lasten und des Leistungsschalters oder der Sicherung. In diesem Abschnitt wird das Phänomen anhand von einfachen Beispielen prinzipiell beschrieben, um so eine allgemeine und grundlegende Beschreibung darzustellen.

[Bild 13](#) zeigt einen elementaren Schaltkreis, in dem eine RLC-Last durch einen Leistungsschalter eingeschaltet wird. [Bild 14](#) zeigt die typischen Ausgleichsvorgänge, die mit diesem Schaltvorgang einhergehen. Diese Spannung ist der Netzfrequenz der Spannung überlagert und stabilisiert sich in diesem Beispiel ungefähr innerhalb einer Periode. Der Spannungshöchstwert wird hauptsächlich durch den Schaltzeitpunkt des Einschaltens, bezogen auf die Spannung des Versorgungssystems, bestimmt. Die höchste hochfrequente Überspannung tritt üblicherweise auf, wenn der Schalter beim Höchstwert der Spannung geschlossen wird (diese ist nicht zu verwechseln mit dem Fehlstrom, welcher für das Zuschalten bei 0 V am höchsten ist).

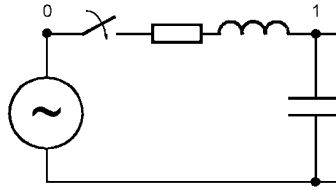


Bild 13 – Erzeugung einer Überspannung durch Schalten eines RLC-Kreises

In den meisten Fällen beträgt die maximale Überspannung ungefähr das Zweifache der Netzspannung. Es können aber höhere Werte auftreten, vor allem, wenn induktive Lasten (Motoren, Transformatoren) oder kapazitive Lasten geschaltet werden. Auch die Unterbrechung von Kurzschlussströmen kann hohe Überspannungen verursachen. Kommt es zu einem Stromabriss, dann können relativ hohe Energien in induktiven Lasten gespeichert werden, und es können auf der Lastseite des öffnenden Schalters oder der öffnenden Sicherung Schwingungen auftreten.

Die Frequenz der Schwingungen, die während Schalthandlungen auftreten, wird bestimmt durch die Kennwerte des Systems und manchmal können Resonanzerscheinungen auftreten. In solchen Fällen können sehr hohe Überspannungen erzeugt werden. Die Wahrscheinlichkeit einer Resonanz mit den Harmonischen der Netzfrequenz des Systems ist üblicherweise gering. Wenn jedoch die Kennfrequenz eines geschalteten Teils des Systems nahe bei einer oder mehreren Resonanzfrequenzen des restlichen Systems liegt, kann ein Zustand einer transienten Resonanz auftreten.

Blitzüberspannungen, die in [Abschnitt 5](#) beschrieben sind, basieren hauptsächlich auf theoretischen Berechnungen, und in diesem Zusammenhang wurde das Prinzip der unbeeinflussten Überspannungen eingeführt (ohne inhärente Spannungsbegrenzung). Im Gegensatz dazu sind für Schaltüberspannungen umfassende theoretische Studien für komplexe Niederspannungssysteme in der Literatur⁵⁾ nicht zu finden. Diese theoretischen Studien sind auch nur schwierig durchzuführen. Stattdessen erhält man Daten aus durchgeführten Messungen und durch Aufzeichnungen von Transienten, wie sie in vorhandenen Systemen oder in Laborexperimenten auftreten.

Die nachfolgenden Überlegungen zu Schaltüberspannungen basieren deshalb zu einem großen Teil auf Messungen, die in realen Niederspannungssystemen durchgeführt worden sind. Deshalb werden diese protokollierten Spannungen durch die Stehspannungsfestigkeit des Systems und der angeschlossenen Betriebsmittel begrenzt. Zusätzlich begrenzen Überspannung-Schutzeinrichtungen (ÜSE) im System (und in Betriebsmitteln eingebaute Überspannung-Schutzeinrichtungen (ÜSE)) die gemessenen Spannungen. Diese Tatsache sollte man bei der Betrachtung der Zahlenwerte berücksichtigen, die in diesem Abschnitt und in [Anhang B](#) vorgestellt werden.

⁵⁾ Mit Ausnahme von Transienten durch Kondensatorschaltungen in Mittelspannungssystemen, die auf die Niederspannungssysteme übertragen wurden; siehe [Abschnitt B.2](#). Diese Transienten waren das Thema sowohl von mehreren Studien als auch von Feldmessungen [23], [13].

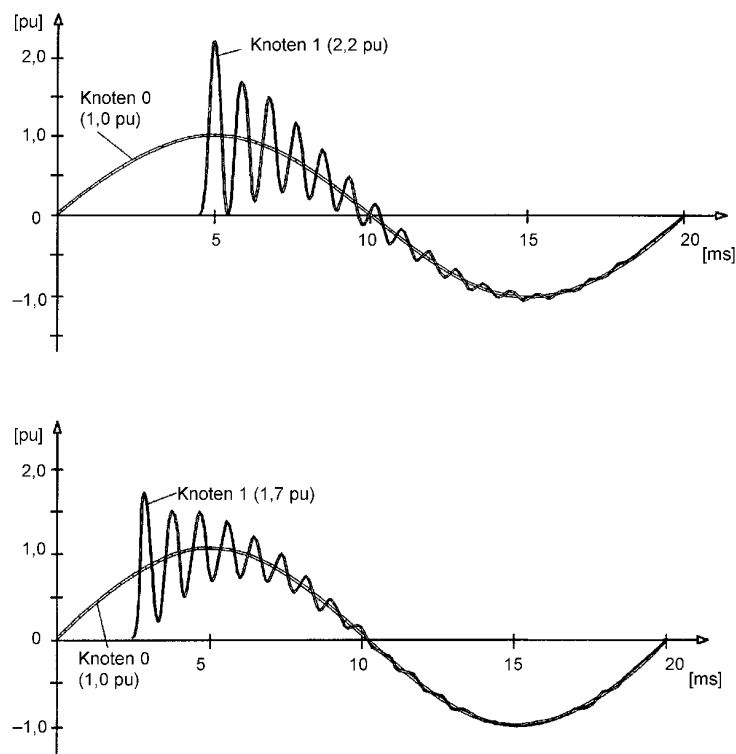


Bild 14 – Typische Verläufe von Schaltüberspannungen

Der typische Verlauf von Schaltüberspannungen wird durch das Verhalten der Niederspannungs-Anlage bestimmt. Diese Situation führt in den meisten Fällen zu einem Nachschwingen, wie es prinzipiell in Bild 14 dargestellt ist. Bild 15 ist ein Beispiel für eine gemessene Schaltüberspannung, aufgezeichnet in einem realen System. Sie weist eine ähnliche Charakteristik auf wie die Schaltüberspannung in Bild 14, jedoch bei höheren Frequenzen.

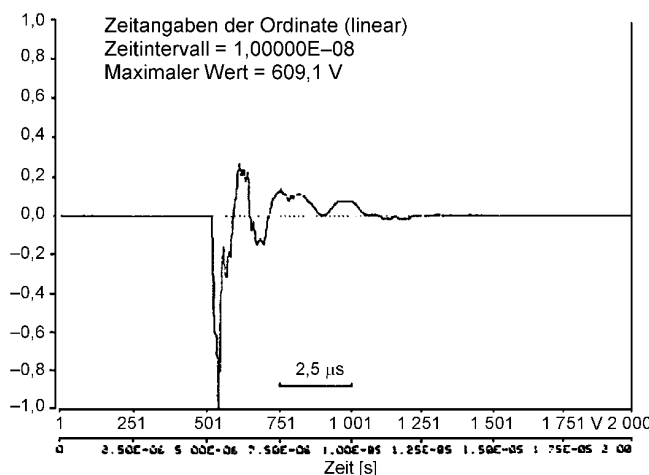


Bild 15 – Beispiel für eine hochfrequente Schaltüberspannung

Die Schwingfrequenz liegt typischerweise im Bereich von einigen Hundert Kilohertz. Die Anstiegszeiten bewegen sich üblicherweise im Bereich von 0,1 μ s bis 0,5 μ s und die maximale Anstiegssteilheit bewegt sich üblicherweise im Bereich von einigen kV/ μ s. Eine typische Verteilung der Anstiegssteilheiten, die enthält keine sehr kurzen Spannungsspitzen („spikes“), wird in Bild 16 gezeigt.

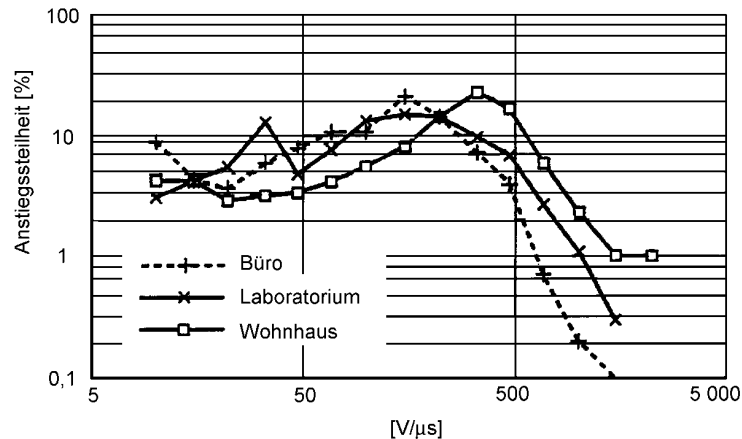


Bild 16 – Verteilung der Anstiegssteilheiten von Schaltüberspannungen an unterschiedlichen Standorten

Die maximalen Amplituden von Schaltüberspannungen sind nicht höher als einige wenige kV; die Anstiegszeiten liegen in einem Bereich von $0,5 \mu\text{s}$ bis $2 \mu\text{s}$. Die Verteilung der Anstiegszeiten wird in Bild 17 dargestellt. Deshalb stimmt die maximale Anstiegssteilheit von typischen Schaltüberspannungen mehr oder weniger mit den Anstiegszeiten der genormten Wellenformen überein. So liegen die Anstiegszeiten des $1,2/50\text{-}\mu\text{s}$ -Impulses oder die $0,5 \mu\text{s}$ der 100-kHz -Ring-Wave in diesem Bereich. Die Übereinstimmung mit dem $1,2/50\text{-}\mu\text{s}$ -Impuls wird in Bild 18 für eher kleine Amplituden dargestellt.

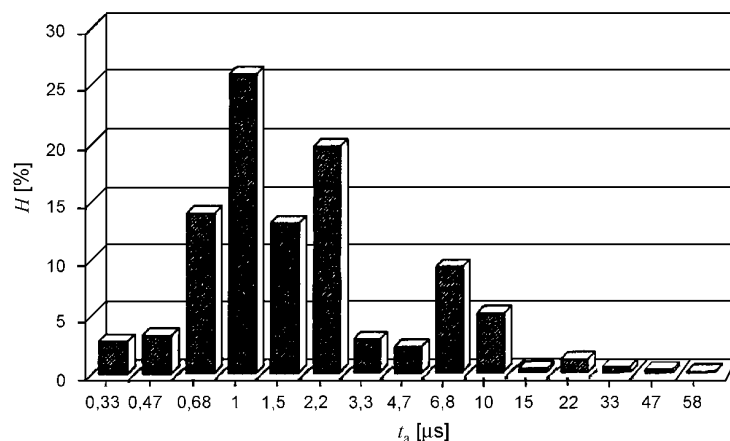


Bild 17 – Verteilung der Anstiegssteilheiten von Schaltüberspannungen

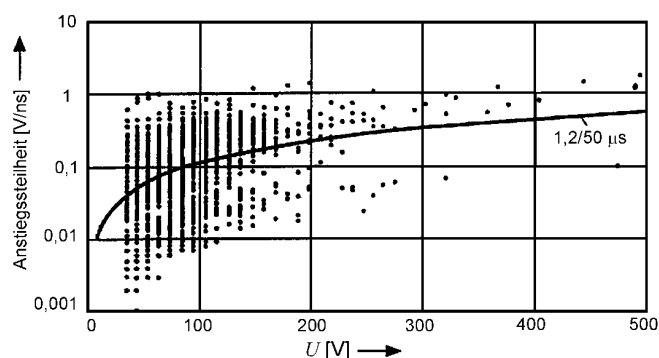


Bild 18 – Anstiegssteilheit von Schaltüberspannungen und deren Scheitelwerte

Die Dauer der Überspannungen verteilt sich über einen viel größeren Zeitabschnitt. Werden die Schaltüberspannungen ausgeschlossen, die durch das Ansprechen von Sicherungen im Falle von Kurzschlussunterbrechungen bei sehr hohen Strömen entstehen, dann bewegt sich die typische Dauer (Rückenhalfwertszeit) im Bereich von $1 \mu\text{s}$ bis $50 \mu\text{s}$, wie dies in Bild 19 dargestellt ist.

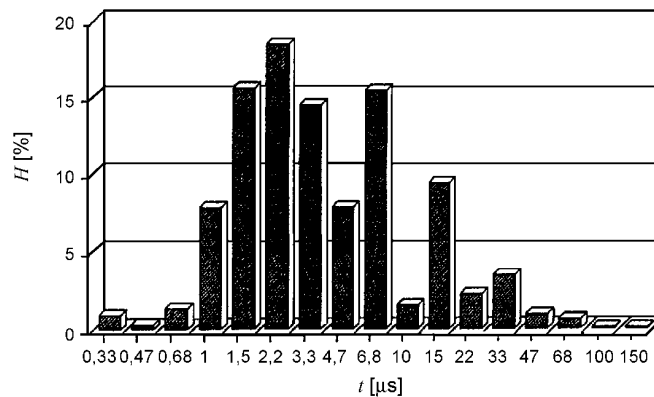


Bild 19 – Verteilung der Dauer (Rückenhalfwertszeiten) von Schaltüberspannungen

6.2 Auslösen von Leistungsschaltern und Schaltern

Leistungsschalter und Schalter sind in jeder Anlage weit verbreitet, entweder zum Schutz von elektrischen Betriebsmitteln durch Abschalten im Falle einer Überlast oder eines Kurzschlusses oder zur Überwachung des Betriebs von Einrichtungen durch Ein- und Ausschalten. Die Häufigkeit der Schalthandlungen hängt vom Anwendungsgebiet ab; mit höheren Schalthäufigkeiten im industriellen Bereich und relativ geringen Häufigkeiten im häuslichen Bereich.

Die Schaltströme liegen bei den meisten ohmschen Lasten im Bereich des Bemessungsstroms der Betriebsmittel. Glühlampen ziehen jedoch einen Einschaltstrom, der ungefähr zehnmal höher liegt als ihr Nennstrom, da der Glühdraht einen niedrigen Widerstand hat, wenn er kalt ist, und so höhere Schaltströme nach sich zieht. Für nicht-ohmsche Lasten, wie Schaltnetzteile, liegen die Schaltströme viel höher als die Bemessungsströme.

Eine Ursache dafür ist der Einschaltstrom, der Kondensatoren auflädt. Zum Beispiel beträgt der Bemessungsstrom bei einem 100-Watt-Fernsehergerät 0,4 A, der Einschaltstrom beträgt aber ungefähr 20 A, ist also 50-mal höher. Ein weiterer Grund ist der Scheitelfaktor von nicht-sinusförmigen Strömen, mit Scheitelströmen, die höher sind, als auf Grund des Effektivwerts zu erwarten wäre.

Das Öffnen von mechanischen Schalteinrichtungen, entweder manuell oder durch elektromechanisches Betätigen, erzeugt während des Schaltvorgangs einen elektrischen Lichtbogen. Durch den plötzlichen Spannungswechsel wird zusammen mit den Induktivitäten und Kapazitäten, die sich in der Nähe des Schalters befinden, eine hochfrequente Schwingung erzeugt. Diese Schwingung ist der Spannung zwischen den Außenleitern und der Spannung zwischen den Außenleitern und Erde überlagert. Und diese gesamte Spannung belastet die Isolierung von elektrischen Betriebsmitteln, was Körper (von Betriebsmitteln) oder andere Stromkreise betrifft. Im Gegensatz zu transienten Überspannungen, die über das öffentliche Niederspannungs-Versorgungssystem in die Verbraucheranlage übertragen werden, werden Schaltungstransienten durch Leistungsschalter oder sonstige Schalter innerhalb der Verbraucheranlage erzeugt, und beeinflussen deshalb die elektrischen Betriebsmittel ohne nennenswerte Dämpfung, so dass die Scheitelwerte dieser Transienten relativ hoch sind.

Die Höhe von Schaltüberspannungen kann durch detaillierte Messungen in elektrischen Anlagen und deren statistische Bewertung abgeschätzt werden. Durch solche Messungen ist es möglich, die Häufigkeit des Auftretens von transienten Überspannungen zu charakterisieren, abhängig entweder von bestimmten Zeitabschnitten während eines Jahres, an bestimmten Wochentagen oder zu bestimmten Tageszeiten. Wenn eine solche zeitabhängige Charakteristik vorliegt, dann kann das Auftreten von Transienten von Ereignissen innerhalb der elektrischen Anlage abgeleitet werden, zum Beispiel das Schalten oder Betreiben von Haushaltsgeräten, welche auf Grund ihrer Ausführung Beeinflussungen erzeugen können.

Messungen in industriellen und in anderen Anlagen haben gezeigt, dass die Häufigkeit des Auftretens von Überspannungen mit ihrer Höhe abnimmt. In Niederspannungssystemen kann für Schaltüberspannungen angenommen werden, dass diese nicht viel höher als bei 4 kV liegen, weil ab dieser Höhe die Luftstrecken von elektrischen Betriebsmitteln sehr wahrscheinlich zu gering sind, um Überschläge zu verhindern, und so die Spitzenwerte der Überspannungen begrenzen. Als ein Beispiel zeigt [Bild 20](#) die statistische Verteilung von Schaltüberspannungen, die man aus Messungen in industriellen Systemen erhalten hat.

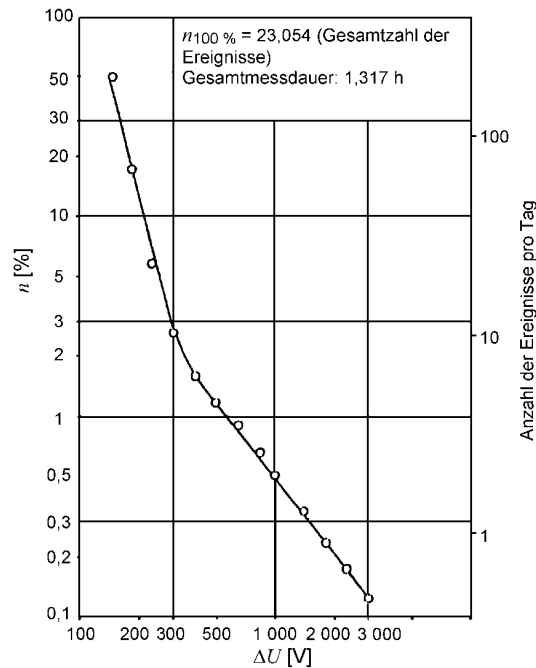


Bild 20 – Beispiel für die Amplitudenverteilung von Schaltüberspannungen – gemessen in einem industriellen 230/400-V-Verteilungssystem

Die statistische Bewertung von ausgedehnten Messungen führte zu der Schlussfolgerung, dass nur 1 bis 2 von 1 000 aufgezeichneten Schaltüberspannungen Impulshöhen von mehr als 2,5 kV erreicht haben. Auch andere Langzeitmessungen, die in unterschiedlichen Arten von Anlagen und an mehreren Orten durchgeführt wurden (siehe [Anhang B](#)), zeigen ähnliche Ergebnisse. Die meisten aufgezeichneten transienten Überspannungen lagen selbst unter einem Wert von 1 kV und nur ein Wert lag bei rund 6 kV.

Es sollte nicht die Schlussfolgerung gezogen werden, dass das Auslösen von Leistungsschaltern und Schaltaktionen im Allgemeinen in Hinblick auf die Erzeugung von Schalttransienten das geringere Problem darstellt. Die Daten, die aus Messungen gewonnen werden, sind nicht immer allumfassend und Schaltüberspannungen können deshalb häufiger auftreten, als dies diese Messdaten vermuten lassen. Deshalb sollte diese Tatsache bei der Abschätzung der Notwendigkeit von Überspannung-Schutzeinrichtungen (ÜSE) beachtet werden. Es sei darauf hingewiesen, dass besonders in industriellen Anlagen die energetische Belastung für Überspannung-Schutzeinrichtungen (ÜSE) relativ hoch sein kann.

ANMERKUNG Die oben zitierten Messungen wurden in realen Anlagen mit angeschlossenen Betriebsmitteln durchgeführt. Selbst wenn Überspannung-Schutzeinrichtungen (ÜSE), die außerhalb der Betriebsmittel installiert waren, entfernt worden sind, werden die Ergebnisse immer beeinflusst durch die Konstruktion der angeschlossenen Betriebsmittel (zum Beispiel deren Luft- und Kriechstrecken, Stehspannungsfestigkeit, Filter und/oder Überspannung-Schutzelemente innerhalb der Betriebsmittel). Diese Ergebnisse werden deshalb nicht die unbeeinflusste Überspannung darstellen, die in der betreffenden Anlage auftreten kann. Die einzige Möglichkeit, wie diese beeinflussenden Faktoren berücksichtigt werden könnten, wären kombinierte Messungen der in einer Anlage auftretenden Impulsspannungen und der dazugehörigen Impulsströme. So könnte die zu erwartende energetische Belastung für Betriebsmittel abgeschätzt werden, falls externe Überspannung-Schutzeinrichtungen (ÜSE) nicht eingebaut werden. Auf Grund der Komplexität von solchen Messungen, sind bis zum gegenwärtigen Zeitpunkt keine solchen Messdaten verfügbar. Weitere Informationen zu diesem möglichen Problem können in [\[34\]](#), [\[9\]](#) und [\[37\]](#) gefunden werden.

6.3 Auslösen von Sicherungen

Verglichen mit anderen Überspannungen, verursacht durch betriebsmäßige Schaltaktionen, sind Überspannungseignisse auf Grund des Auslösens von Sicherungen weniger häufig. Jedoch können im Falle der Unterbrechung eines Kurzschlusses sehr starke Schaltüberspannungen erzeugt werden. Diese Bedingung wird hauptsächlich beeinflusst von der Anstiegsteilheit des Kurzschlussstroms, der Kennlinie der Sicherung und ihrer Bemessungsstromstärke und von der Induktivität des Stromkreises.

In elektrischen Betriebsmitteln werden sehr häufig Feinsicherungen mit Bemessungsstromstärken zwischen 0,0032 A und 10 A eingesetzt.

Bild 21 zeigt die Schaltüberspannung im Falle einer Kurzschlussunterbrechung durch eine Feinsicherung mit einer Bemessungsstromstärke von 1 A. In diesem Fall liegt die Amplitude der Schaltüberspannung „ziemlich hoch“, aber deren Dauer ist „ziemlich kurz“. In einer Testreihe, die mit Sicherungen in einem Bereich von 1 A bis 10 A durchgeführt wurde, hat man herausgefunden, dass die Amplituden der Schaltüberspannungen nahezu konstant blieben, nämlich in einer Höhe von etwa 2,6 kV.

Jedoch auf Grund der zunehmenden Zeitdauer (vgl. Tabelle 5) der Überspannungen nimmt der Energieinhalt mit steigenden Bemessungsstromstärken der Sicherungen wesentlich zu. Die Anstiegssteilheit der Überspannungen kann bis zu 2,6 kV/ μ s erreichen. Bei einigen Bemessungsstromstärken der Sicherung wird die Schaltüberspannung auch durch die Sicherungscharakteristik beeinflusst. Ein flinker Sicherungseinsatz verursacht Überspannungen mit einer kürzeren Dauer als ein träger Sicherungseinsatz.

Tabelle 5 – Rückenhalbwertszeit von Schaltüberspannungen bei unterschiedlichen Bemessungsstromstärken von Feinsicherungen

Bemessungsstrom der Sicherung A	Rückenhalbwertszeit μ s
1	8
1	24
1,6	36
10	64

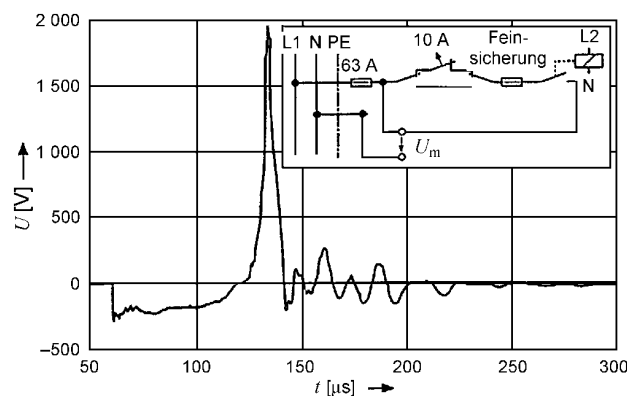


Bild 21 – Schaltüberspannung bei Kurzschlussstromunterbrechung durch eine Feinsicherung [48]

Das Abschalten eines Kurzschlusses durch eine Sicherung, die in der Nähe der Sammelschiene im Abgangsfeld eines Verteilungssystems eingebaut ist, ist ein sehr wichtiger Vorgang, weil die Überspannung, die durch das Abschalten der Sicherung erzeugt wird, auf alle anderen elektrischen Verbrauchsmittel einwirkt, die mit der gleichen Sammelschiene verbunden sind. Auf Statistiken basierende Erfahrungen haben gezeigt, dass ein solcher Fehler eher selten im öffentlichen Niederspannungs-Versorgungssystem auftritt. Jedoch ist diese Art von Fehlern für industrielle Verteilungssysteme bedeutsam, da in diesen Systemen ein Kurzschluss kein so seltenes Ereignis darstellt. [Anhang B](#) liefert zwei Beispiele für Messungen: Die eine Messung wurde bei einem Kurzschluss durchgeführt, der sich im Stromkreis in der Nähe einer Abgangssicherung ereignet hat, die andere Messung wurde bei einem Kurzschluss aufgezeichnet, der sich an einem Kabelende ereignete.

6.4 Häufigkeit von Ereignissen

Sowohl die relativen Werte der Wahrscheinlichkeit von Schaltüberspannungs-Ereignissen als auch die absoluten Werte können abgeschätzt werden. Die erste Methode, die der relativen Werte, ist eher geeignet, wenn unterschiedliche Messungen und/oder unterschiedliche Standorte verglichen werden müssen.

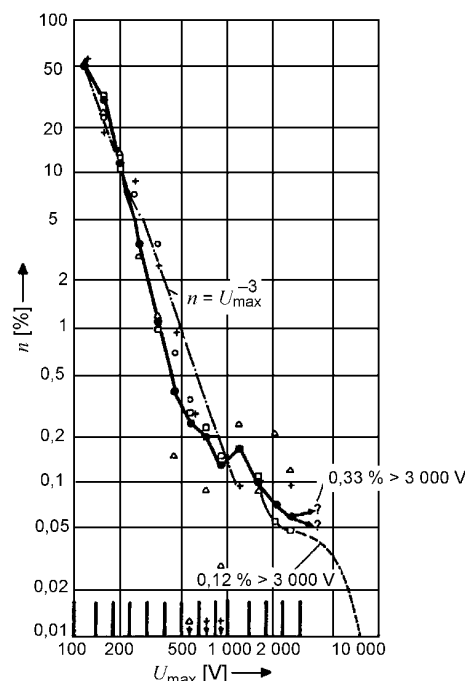
Als Erfahrungswert kann gelten, dass die Wahrscheinlichkeit eines Schaltüberspannungs-Ereignisses indirekt proportional ist zur dritten Potenz ihrer Amplitude. Dieses Verhalten, welches als die „Dritte-Potenz-Regel“ bezeichnet wird, ist in [Bild 22](#) für drei Arten von Standorten dargestellt [44], [21]. Jedoch scheint im Allgemeinen die Tendenz zu gelten, dass bei zunehmender Amplitude der Schaltüberspannung gewisse Abweichun-

gen von der „Dritte-Potenz-Regel“ auftreten. Diese Abweichungen scheinen bei bestimmten Arten von Standorten ausgeprägter zu sein, wie zum Beispiel bei gewerblich genutzten Einrichtungen.

In Bild 22 ist die relative Wahrscheinlichkeit eines Schaltüberspannungs-Ereignisses mit einer Amplitude von 2,5 kV etwa 5- bis 10-mal höher, verglichen mit der Extrapolation der „Dritten-Potenz-Linie“ für den Bereich der niedrigeren Amplituden. Da dieses Ergebnis nur auf einigen wenigen Messpunkten basiert, ist es mit einer ziemlichen Unsicherheit behaftet und wird hier nur als Beispiel aufgeführt. Da wesentliche Unterschiede zwischen den Überspannungscharakteristiken an unterschiedlichen Standorten festzustellen sind, was das gemeinsame Ergebnis aller Untersuchungen darstellt, sollten deshalb diese Angaben gesondert und detaillierter untersucht werden [42].

6.5 Wechselwirkungen mit Überspannung-Schutzeinrichtungen (ÜSE)

Weil Schaltüberspannungen die Reaktion der Anlage auf die Spannungen, Ströme und gespeicherte Energie in den Schaltkreisen bei der Netzfrequenz enthält, kann ihr Energieinhalt beträchtlich sein. Wie jedoch bereits weiter oben erwähnt, sind ihre Amplituden oft begrenzt, was die Möglichkeit eröffnet, das Risiko zu vermeiden, dass eine Überspannung-Schutzeinrichtung (ÜSE) versucht, die Überspannungen zu begrenzen. Netzdesigner und Betriebsmittelentwickler sollten deshalb Überspannung-Schutzeinrichtungen (ÜSE) unter Berücksichtigung von möglichen Schaltüberspannungsereignissen mit hohem Energieinhalt anwenden, wie es in [Abschnitt 12](#) erörtert wurde.



Legende

- alle Daten
- industriell
- △ gewerblich
- Haushalt
- + Laboratorien

Bild 22 – Verteilung der relativen Wahrscheinlichkeit von Schaltüberspannungsereignissen in verschiedenen Anlagen

6.6 Zusammenfassung zu Schaltüberspannungen

In den meisten Fällen liegen die maximal auftretenden Schaltüberspannungen im Bereich des Zweifachen der Amplitude der Netzspannung. Aber es können höhere Werte auftreten, besonders wenn induktive Lasten (Motoren, Transformatoren) oder kapazitive Lasten geschaltet werden. Auch die Unterbrechung von Kurzschlussströmen kann hohe Überspannungen verursachen. Wenn es zu einem Stromabriss kommt, dann

können relativ hohe Energien in induktiven Lasten gespeichert werden, und es können dann auf der Lastseite des öffnenden Schalters oder der Sicherung Schwingungen auftreten.

Die Höhe von Schaltüberspannungen kann durch detaillierte Messungen in elektrischen Anlagen und deren statistische Bewertung abgeschätzt werden. Durch solche Messungen kann die Häufigkeit von transienten Überspannungsereignissen in Abhängigkeit von bestimmten Zeitabschnitten innerhalb eines Jahres, von bestimmten Wochentagen oder von bestimmten Tageszeiten abgeschätzt werden. Zu beachten sind jedoch die Begrenzungseffekte von undefinierten Überspannung-Schutzeinrichtungen (ÜSE), die in der Anlage vorhanden sein können. Liegt eine solche zeitabhängige Charakteristik vor, dann kann das Auftreten von Transienten von Ereignissen innerhalb der elektrischen Anlage abgeleitet werden, zum Beispiel das Schalten oder das Betreiben von Haushaltsgeräten, welche auf Grund ihrer speziellen Ausführung Beeinflussungen erzeugen können.

Diese Betrachtungen machen es notwendig, die Wahrscheinlichkeit abzuschätzen, ob eine mögliche Überspannung-Schutzeinrichtung (ÜSE), die für den Schutz gegenüber Schaltüberspannungen eingesetzt werden soll, auch eine wirksame Spannungsbegrenzung liefern kann. Als Nächstes sollte dann bestimmt werden, ob die Überspannung-Schutzeinrichtung (ÜSE) auch die notwendige Stromtragfähigkeit besitzt, um die Stromstärken und die Stromflussdauer zu beherrschen, die für Schaltüberspannungen an der entsprechenden Stelle zu erwarten sind.

7 Zeitweilige Überspannungen

7.1 Allgemeines

Ein weiter Bereich von Phänomenen, entweder herrührend aus üblichen Netzvorgängen oder resultierend aus zufälligen Netzbedingungen, kann ebenfalls Überspannungen erzeugen. Sie müssen unterschieden werden von den Schaltüberspannungen, wie sie im vorausgegangen Abschnitt erörtert wurden. Diese Überspannungen treten mit der Netzfrequenz auf und erfordern im Allgemeinen das Auslösen irgendeiner vorhandenen Überstrom-Schutzeinrichtung, um den Stromkreis freizuschalten, sollten Betriebsmittel unter dieser Belastung versagen. Es ist jedoch anzumerken, dass im Allgemeinen Betriebsmittel dafür ausgelegt sind, diesen zeitweiligen Überspannungsbelastungen standzuhalten. Überspannung-Schutzeinrichtungen (ÜSE) nach dem heutigen Stand der Technik, wie sie zum Schutz vor Blitz- und Schaltüberspannungen eingesetzt werden, haben nicht die Energietragfähigkeit, die notwendig wäre, um solche zeitweiligen Überspannungen zu begrenzen. Deshalb sollte bei der Auswahl der höchsten Dauerspannung einer Überspannung-Schutzeinrichtung (ÜSE) in einer bestimmten Anlage die an dieser bestimmten Stelle zu erwartende Höhe und die Wahrscheinlichkeit eines zeitweiligen Überspannungsereignisses berücksichtigt werden.

7.2 Intensität zeitweiliger Überspannungen auf Grund von Mittelspannungs- und Niederspannungsstörungen

Zeitweilige Überspannungen werden definiert als Wechselspannungsüberspannungen von beträchtlicher Zeitdauer und Amplitude, die in einem System nach einem Störzustand auftreten können. Sie rühren im Allgemeinen her von Isolationsfehlern oder vom Verlust eines Versorgungsleiters in der elektrischen Mittel- oder Niederspannungsanlage. Produktnormen berücksichtigen diese Phänomene durch geeignete Isolationsanforderungen und Prüfungen. IEC 60364-4-442 liefert dazu einige Informationen und Angaben, die hier kurz zusammengefasst werden. Zusätzliche Details sind in [Anhang C](#) aufgeführt.

ANMERKUNG In Systemen, in denen die Mittelspannungs- und Niederspannungsleitungen auf den selben Masten angebracht sind, oder in Systemen, in denen zwei Mittelspannungsebenen ebenfalls auf den gleichen Masten befestigt sind, kann es zu einer versehentlichen Berührung dieser Systeme kommen („Commingling“). Dies verursacht beträchtliche Überspannungen im Niederspannungssystem. Bei der Anwendung von Überspannung-Schutzeinrichtungen (ÜSE) in Niederspannungssystemen werden solche Berührungen im Allgemeinen nicht mit einbezogen. Sollten jedoch solche außergewöhnlichen Ereignisse mitberücksichtigt werden, dann müssen spezielle Überspannung-Schutzeinrichtungen (ÜSE) verwendet werden, um dieses Ereignis zu überstehen oder zumindest in einer akzeptablen Art und Weise zu versagen. Eine weitere Diskussion dieses Problems kann man in [Anhang C](#) finden.

Abhängig von der Konfiguration des Erdungssystems der Mittelspannungs- und Niederspannungsnetzwerke fließt der Mittelspannungs-Erdschlussstrom in einen oder mehrere Erder und erzeugt im Niederspannungssystem durch Erdkopplung Wechselspannungsüberspannungen.

Die wesentlichen Parameter, die den Wert und die zeitliche Dauer dieser Überspannungen beeinflussen, sind nachfolgend aufgelistet.

All diese Einflussfaktoren werden von den Konstrukteuren des Energieversorgungssystems bestimmt.