

	DIN IEC 60865-1 (VDE 0103)	
	Diese Norm ist zugleich eine VDE-Bestimmung 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 01.040.29; 29.240.01	<div data-bbox="628 618 1058 705" data-label="Text"> <p style="text-align: center;">Entwurf</p> </div> <div data-bbox="240 799 868 940" data-label="Section-Header"> <p>Kurzschlussströme – Berechnung der Wirkung – Teil 1: Begriffe und Berechnungsverfahren (IEC 73/147A/CD:2008)</p> </div> <div data-bbox="240 972 780 1097" data-label="Text"> <p>Short-circuit currents – Calculation of effects – Part 1: Definitions and calculation methods (IEC 73/147A/CD:2008)</p> </div> <div data-bbox="240 1131 772 1256" data-label="Text"> <p>Courants de court-circuit – Calcul des effets – Partie 1: Définitions et méthodes de calcul (CEI 73/147A/CD:2008)</p> </div> <div data-bbox="240 1303 596 1335" data-label="Section-Header"> <p>Anwendungswarnvermerk</p> </div> <div data-bbox="240 1364 1445 1426" data-label="Text"> <p>Dieser Norm-Entwurf mit Erscheinungsdatum 2009-03-09 wird der Öffentlichkeit zur Prüfung und Stellungnahme vorgelegt.</p> </div> <div data-bbox="240 1453 1445 1514" data-label="Text"> <p>Weil die beabsichtigte Norm von der vorliegenden Fassung abweichen kann, ist die Anwendung dieses Entwurfes besonders zu vereinbaren.</p> </div> <div data-bbox="240 1543 617 1574" data-label="Text"> <p>Stellungnahmen werden erbeten</p> </div> <div data-bbox="240 1588 1434 1720" data-label="List-Group"> <ul style="list-style-type: none"> – vorzugsweise als Datei per E-Mail an dke@vde.com in Form einer Tabelle. Die Vorlage dieser Tabelle kann im Internet unter www.dke.de/stellungnahme abgerufen werden – oder in Papierform an die DKE Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik im DIN und VDE, Stresemannallee 15, 60596 Frankfurt am Main. </div> <div data-bbox="240 1744 1445 1807" data-label="Text"> <p>Die Empfänger dieses Norm-Entwurfs werden gebeten, mit ihren Kommentaren jegliche relevante Patentrechte, die sie kennen, mitzuteilen und unterstützende Dokumentationen zur Verfügung zu stellen.</p> </div> <div data-bbox="1126 1856 1445 1888" data-label="Text"> <p>Gesamtumfang 102 Seiten</p> </div> <div data-bbox="320 1930 1362 1962" data-label="Text"> <p>DKE Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik im DIN und VDE</p> </div>	<div data-bbox="1090 508 1402 537" data-label="Text"> <p>Einsprüche bis 2009-05-31</p> </div> <div data-bbox="1090 553 1461 683" data-label="Text"> <p>Vorgesehen als Ersatz für DIN EN 60865-1 (VDE 0103):1994-11 und DIN EN 60865-1 Berichtigung 1 (VDE 0103 Berichtigung 1):1996-08</p> </div>

Beginn der Gültigkeit

Diese Norm gilt ab ...

Kurzschlussströme – Berechnung der Wirkung – Teil 1: Begriffe und Berechnungsverfahren

Inhalt

	Seite
1. Anwendungsbereich und Zweck.....	6
2. Normative Verweisungen.....	6
3. Begriffe, Formelzeichen und ihre Einheiten.....	7
3.1 Begriffe.....	7
3.2 Formelzeichen und ihre Einheiten	8
4. Allgemeines	12
5. Anordnungen mit biegesteifen Leitern	13
5.1 Allgemeines	13
5.2 Berechnung der elektromagnetischen Kräfte	13
5.3 Wirksame Abstände zwischen Hauptleitern und zwischen Teilleitern	14
5.4 Berechnung der Spannungen in biegesteifen Leitern	15
5.5 Belastung der Stützpunkte durch biegesteife Leiter	17
5.6 Berücksichtigung der Automatischen Wiedereinschaltung	17
5.7 Berechnung unter besonderer Berücksichtigung der Leiterschwingung.....	17
6. Anordnungen mit Leiterseilen	19
6.1 Allgemeines	19
6.2 Wirkung auf horizontal angeordnete Hauptleiter	19
6.3 Wirkung auf vertikal verlaufende Seile (Schlaufen).....	25
6.4 Wirkung auf Bündelleiter.....	26
6.5 Belastung der Stützpunkte durch Leiterseile	28
7. Thermische Wirkung auf blanke Leiter	28
7.1 Allgemeines	28
7.2 Berechnung des Temperaturanstiegs	29
7.3 Berechnung des thermisch gleichwertigen Kurzschlussstroms	29
7.4 Berechnung des Temperaturanstiegs und der Bemessungs-Kurzschlussstromdichte für Leiter	29
7.5 Ermittlung der thermischen Kurzschlussfestigkeit für verschiedene Stromflusszeiten	29
Anhang A (normativ) Gleichungen zur Berechnung der Diagramme	46
A.1 Formelzeichen	46
A.2 Gleichung zu Bild 1	46

	Seite
A.3 Gleichung zu Bild 3.....	47
A.4 Gleichung zu Bild 4.....	47
A.5 Gleichung zu Bild 5.....	48
A.6 Gleichung zu Bild 7.....	48
A.7 Gleichung zu Bild 9.....	48
A.8 Gleichung zu Bild 10.....	49
A.9 Gleichung zu Bild 11.....	49
A.10 Gleichung zu Bild 12.....	49
A.11 Gleichung zu Bild 13.....	50
Literaturhinweise.....	51
 Bild 1 – Faktor k_{1S} zur Berechnung des wirksamen Leiterabstands.....	34
Bild 2 – Belastungsrichtung und Biegeachsen bei Schienenpaketen	35
Bild 3 – Faktor c für den Einfluß von Zwischenstücken in Gleichung (17)	36
Bild 4 – Faktoren V_F , V_σ und $V_{\sigma S}$ bei drei- und zweipoligen Kurzschlüssen	37
Bild 5 – Faktoren V_r und V_{rs} für dreipolige Automatische Wiedereinschaltung	38
Bild 6 – Maximaler Ausschwingwinkel δ_m bei bekannter maximaler Kurzschlussdauer T_{k1}	38
Bild 7 – Faktor ψ für Zugkräfte in Leiterseilen	39
Bild 8 – Geometrie der Schlaufe.....	39
Bild 9 – ν_2 als Funktion von ν_1	40
Bild 10 – $\nu_3 \sin \frac{180^\circ}{n}$ als Funktion von a_s/d_s	41
Bild 11 – ξ als Funktion von j und ε_{st}	41
Bild 12 a – η als Funktion von j und ε_{st} für $2,5 < a_s/d_s \leq 5,0$	42
Bild 12 b – η als Funktion von j und ε_{st} für $5,0 < a_s/d_s \leq 10,0$	43
Bild 12 c – η als Funktion von j und ε_{st} für $10,0 < a_s/d_s \leq 15,0$	44
Bild 13 – Abhängigkeit der Bemessungs-Kurzschlussstromdichte ($T_{kr} = 1$ s) von der Leitertemperatur	45
 Tabelle 1 – Wirksamer Teilleiterabstand a_s für Rechteckprofile. Angaben in Meter	30
Tabelle 2 – Höchstwerte von V_σ , V_r , $V_{\sigma S}$, V_{rs} , V_F , V_r	31
Tabelle 3 – Faktoren α , β und γ bei verschiedenen Trägern und Befestigungen.....	32
Tabelle 4 – Faktor q	33
Tabelle 5 – Widerstandsmomente Z von Hauptleitern mit zwei oder mehr Versteifungselementen zwischen zwei benachbarten Stützpunkten.	33
Tabelle 6 – Empfohlene maximale Temperaturen während eines Kurzschlusses für mechanisch belastete Leiter	34

Nationales Vorwort

Das internationale Dokument IEC 73/147A/CD:2008 „Short-circuit currents – Calculation of effects – Part 1: Definitions and calculation methods“ (CD, en: Committee Draft) ist unverändert in diesen Norm-Entwurf übernommen worden. Dieser Norm-Entwurf enthält eine noch nicht autorisierte deutsche Übersetzung.

Um Zweifelsfälle in der Übersetzung auszuschließen, ist die englische Originalfassung des CD entsprechend der diesbezüglich durch die IEC erteilten Erlaubnis beigelegt. Die Nutzungsbedingungen für den deutschen Text des Norm-Entwurfes gelten gleichermaßen auch für den englischen IEC-Text.

Das internationale Dokument wurde vom TC 73 „Short-circuit currents“ der Internationalen Elektrotechnischen Kommission (IEC) erarbeitet und den nationalen Komitees zur Stellungnahme vorgelegt.

Die IEC und das Europäische Komitee für Elektrotechnische Normung (CENELEC) haben vereinbart, dass ein auf IEC-Ebene erarbeiteter Entwurf für eine Internationale Norm zeitgleich (parallel) bei IEC und CENELEC zur Umfrage (CDV-Stadium) und Abstimmung als FDIS (en: Final Draft International Standard) bzw. Schluss-Entwurf für eine Europäische Norm gestellt wird, um eine Beschleunigung und Straffung der Normungsarbeit zu erreichen. Dokumente, die bei CENELEC als Europäische Norm angenommen und ratifiziert werden, sind unverändert als Deutsche Normen zu übernehmen.

Da der Abstimmungszeitraum für einen FDIS bzw. Schluss-Entwurf prEN nur 2 Monate beträgt, und dann keine sachlichen Stellungnahmen mehr abgegeben werden können, sondern nur noch eine „JA/NEIN“-Entscheidung möglich ist, wobei eine „NEIN“-Entscheidung fundiert begründet werden muss, wird bereits der CD als DIN-Norm-Entwurf veröffentlicht, um die Stellungnahmen aus der Öffentlichkeit frühzeitig berücksichtigen zu können.

Für diesen Norm-Entwurf ist das nationale Arbeitsgremium UK 121.2 „Mechanische und thermische Kurzschlussfestigkeit“ der DKE Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik im DIN und VDE (www.dke.de) zuständig.

Änderungen

Gegenüber DIN EN 60865-1 (VDE 0103):1994-11 und DIN EN 60865-1 Berichtigung 1 (VDE 0103 Berichtigung 1):1996-08 wurden folgende Änderungen vorgenommen:

- a) die Abschnitte sind neu numeriert;
- b) die Festlegungen zur Berücksichtigung der Automatischen Wiedereinschaltung bei biegesteifen Leitern ist überarbeitet;
- c) bei Anordnung mit Leiterseilen wird auch der Einfluss einer in Spannungsmitte angebrachten vertikalen Seilverbindung auf die Seilzugkräfte im Spannungsfeld und die horizontale Auslenkung berücksichtigt;
- d) die Kraft auf den unteren Befestigungspunkt einer vertikalen Seilverbindung, z. B. zwischen unterschiedlich hohen Geräten, kann ermittelt werden;
- e) Angaben zu den Bemessungslasten für Fundamente in Seilanlagen sind eingefügt;
- f) der thermisch gleichwertige Kurzschlussstrom wird in DIN EN 60909-0 ermittelt, der entsprechende Abschnitt kann entfallen;
- g) der Nachweis der thermischen Kurzschlussfestigkeit von Betriebsmitteln ist gestrichen.

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 in Tabelle NA.1 wiedergegeben.

Tabelle NA.1

Europäische Norm	Internationale Norm	Deutsche Norm	Klassifikation im VDE-Vorschriftenwerk
EN 60909	IEC 60909	DIN EN 60909-0 (VDE 0102)	VDE 0102
—	IEC 60949:1988-01 + A1:2008-09	—	—
—	IEC 60986:2000-10 + A1:2008-09	—	—
EN 61660-1:1997	IEC 61660-1:1997	DIN EN 61660-1 (VDE 0102-10):1998-06	VDE 0102-10
— ^{a)}	IEC 61936-1:2002 ¹⁾	— ^{a)}	— ^{a)}
^{a)} Diese Internationale Norm wird derzeit bei IEC und CENELEC überarbeitet. Für die überarbeitete Fassung gibt es bereits einen deutschen Entwurf E DIN EN 61936-1 (VDE 0101-1):2008-12.			

Nationaler Anhang NB (informativ)

Literaturhinweise

DIN EN 60909-0 (VDE 0102), *Kurzschlussströme in Drehstromnetzen*

DIN EN 61660-1 (VDE 0102-10):1998-06, *Kurzschlußströme; Kurzschlußströme in Gleichstrom-Eigenbedarfsanlagen in Kraftwerken und Schaltanlagen – Teil 1: Berechnung der Kurzschlußströme (IEC 61660-1:1997; Deutsche Fassung EN 61660-1:1997)*

1. Anwendungsbereich

Diese Internationale Norm ist anwendbar auf die mechanischen und thermischen Wirkungen der Kurzschlussströme. Sie enthält Verfahren zur Berechnung der

- elektromagnetischen Wirkung auf biegesteife Leiter und Leiterseile;
- elektrothermischen Wirkung auf blanke Leiter.

Für Kabel und isolierte Leitungen wird auf z. B. IEC 60949 und IEC 60986 verwiesen.

Diese Norm gilt nur für Dreh- und Wechselstromanlagen.

Die folgenden Punkte sollten besonders beachtet werden:

- a) Die Kurzschlussstromberechnung sollte nach IEC 60909 durchgeführt werden. Zur Ermittlung des größtmöglichen Kurzschlussstroms dürfen zusätzliche Angaben anderer IEC-Normen berücksichtigt werden, z. B. über die der Berechnung zugrundezulegende Schaltung oder über strombegrenzende Einrichtungen, falls dies zu einer Verringerung der Beanspruchung führt.
- b) Die in dieser Norm einzusetzende Kurzschlussdauer hängt vom Schutzkonzept ab und sollte dementsprechend berücksichtigt werden.
- c) Die genormten Rechenverfahren sind auf praktische Erfordernisse ausgerichtet und enthalten Vereinfachungen, die konservativ sind. Prüfungen oder ausführlichere Rechenverfahren oder beide dürfen angewendet werden.
- d) Für biegesteife Leiter werden im Abschnitt 5 dieser Norm nur die Beanspruchungen durch Kurzschlussströme berechnet. Zusätzlich können noch weitere Beanspruchungen vorhanden sein, z. B. hervorgerufen durch statische Last, Wind, Eis, Schaltkräfte, Erdbeben. Die Kombination dieser Lasten mit der Kurzschlussbelastung sollte Teil einer Absprache sein und/oder in Normen geregelt werden, z. B. in Errichtungsvorschriften.
Bei Leiterseilen enthalten die Seilzugkräfte die statische Last. Bezüglich der Kombination mit anderen Lasten gelten die zuvor genannten Überlegungen entsprechend.
- e) Die ermittelten Bemessungslasten dürfen als Ausnahmelast entsprechend den Errichtungsvorschriften, wie z. B. IEC 61936-1, angesetzt werden.

2. Normative Verweisungen

Die folgenden Normen enthalten Festlegungen, die durch Verweisung in diesem Text Bestandteil dieser Norm sind. Bei datierten Normen sind die angegebenen Ausgaben anzuwenden. Bei undatierten Normen ist die neueste Ausgabe einschließlich aller Änderungen anzuwenden.

IEC 60909, *Short-circuit current calculation in three-phase a.c. systems*

IEC 60949:1988-01, *Calculation of thermally permissible short-circuit currents, taking into account non-adiabatic heating effects*

IEC 60986:2000-10, *Short-circuit temperature limits of electric cables with rated voltages from 6 kV ($U_m = 7,2 \text{ kV}$) up to 30 kV ($U_m = 36 \text{ kV}$)*

IEC 61660-1:1997-06, *Short-circuit currents in d.c. auxiliary installations in power plants and substations. – Part 2: Calculation of effects*

IEC 61936-1:2002-10, *Power installations exceeding 1 kV a.c. – Part 1: Common rules*

3 Begriffe, Formelzeichen und ihre Einheiten

3.1 Begriffe

Für die Anwendung dieses Dokuments gelten die folgenden Begriffe. Auf das Internationale Elektrotechnische Wörterbuch (IEC 60050) wird, wenn anwendbar, verwiesen.

3.1.1

Hauptleiter

ein Leiter oder die Anordnung mehrerer Leiter, die den gesamten Strom eines Stranges führen

3.1.2

Teilleiter

ein einzelner Leiter, der einen bestimmten Teil des gesamten Stromes eines Stranges führt und Teil des Hauptleiters ist

3.1.3

Einspannung

Stützpunkt eines biegesteifen Leiters, in den Momente in der betrachteten Biegeebene eingeleitet werden

3.1.4

Stützung

Stützpunkt eines biegesteifen Leiters, in den keine Momente in der betrachteten Biegeebene eingeleitet werden

3.1.5

Zwischenstück

jede zusätzliche Masse innerhalb eines Stützabstands, die nicht zur gleichmäßigen Leitermasse gehört. Hierzu zählen u. a. Abstandhalter, Versteifungselemente, Schienenüberlappungen, Abzweigungen usw.

3.1.6

Abstandhalter

Bauelement zwischen biegesteifen Teilleitern oder Bündelseilen, das am Einbauort den Teilleiterabstand aufrechterhält

3.1.7

Versteifungselement

besonderes Zwischenstück, das die mechanischen Spannungen in biegesteifen Leitern verringert

3.1.8

maßgebliche Eigenfrequenz

f_c

ungedämpfte erste Eigenfrequenz der Leitereigenschwingung bei Einfeldträgern, und ungedämpfte Eigenfrequenz der Ordnung ν bei über ν Felder durchlaufenden Mehrfeldträgern

3.1.9

Kurzschluss-Seilzugkraft

F_t

maximale Seilzugkraft in einem Hauptleiter, die durch das Ausschlagen während des Kurzschlusses erreicht wird

3.1.10

Fall-Seilzugkraft

F_f

maximale Seilzugkraft in einem Hauptleiter, die beim Herabfallen der ausgeschlagenen Seile auftritt

3.1.11

Bündel-Seilzugkraft

F_{pi}

maximale Seilzugkraft in Seilbündeln während des Kurzschlusses, hervorgerufen durch die Annäherung der Teilleiter im Bündel

3.1.12

Dauer des ersten Kurzschlussstrom-Flusses

T_{k1}

Zeitintervall zwischen dem Kurzschlusseintritt und der ersten Stromunterbrechung

3.1.13

thermisch gleichwertiger Kurzschlussstrom

I_{th}

Effektivwert des Stromes mit der gleichen thermischen Wirkung und der gleichen Dauer wie der tatsächliche Kurzschlussstrom, der eine Gleichstromkomponente haben und zeitlich abklingen kann

3.1.14

thermisch gleichwertige Kurzschlussstromdichte

S_{th}

thermisch gleichwertiger Kurzschlussstrom dividiert durch den Leiterquerschnitt

3.1.15

Bemessungs-Kurzschlussstromdichte für Leiter

S_{thr}

Effektivwert der Stromdichte, der ein Leiter während der Bemessungs-Kurzzeit standhält

3.1.16

Kurzschlussdauer

T_k

Summe der Zeitabschnitte, in denen ein Kurzschlussstrom fließt, vom Beginn des ersten Kurzschlusses bis zur endgültigen Abschaltung der Ströme in allen Strängen

3.1.17

Bemessungs-Kurzschlusszeit

T_{kr}

Zeitdauer, während der ein Leiter einer Stromdichte gleich seiner Bemessungs-Kurzschlussstromdichte standhält

3.2 Formelzeichen und ihre Einheiten

Alle in dieser Norm aufgeführten Gleichungen sind Größengleichungen, in denen die Formelzeichen physikalische Größen darstellen, die sowohl einen Zahlenwert als auch eine Einheit haben.

Die in dieser Norm verwendeten Formelzeichen sind mit ihren SI-Einheiten in den folgenden Tabellen angegeben.

Formelzeichen	Bedeutung	SI-Einheit
A	Hauptleiterquerschnitt	m^2
A_s	Teilleiterquerschnitt	m^2
A	Leitermittenabstand	m
a_m	wirksamer Abstand zwischen Hauptleitern	m
a_{min}	minimaler Leiterabstand	m
a_s	wirksamer Abstand zwischen Teilleitern	m

Formelzeichen	Bedeutung	SI-Einheit
a_{1n}	Mittenabstand zwischen Teilleiter 1 und Teilleiter n	m
a_{1s}	Teilleitermittenabstand	m
b	Teilleiterabmessung senkrecht zur Krafrichtung	m
b_c	statischer Ersatz-Seildurchhang in Spannungsfeldmitte	m
b_{c0}	statischer Seildurchhang in Spannungsfeldmitte	m
b_{ct}	dynamischer Seildurchhang in Spannungsfeldmitte	m
b_d	Schlaufenbreite	m
b_h	maximale horizontale Seilauslenkung	m
b_{hd}	maximale horizontale Auslenkung der Seilschleife	m
b_m	Hauptleiterabmessung senkrecht zur Krafrichtung	m
c	Faktor für den Einfluss von Zwischenstücken	1
c_{th}	Materialkonstante	$m^4/(A^2s)$
C_D	Faktor für die Durchhangvergrößerung durch Seildehnung	1
C_F	Faktor für die Durchhangvergrößerung durch Änderung der Seilkurvenform	1
D	Außendurchmesser von Rohrleitern	m
d	Teilleiterabmessung in Krafrichtung	m
d_m	Hauptleiterabmessung in Krafrichtung	m
d_s	Seildurchmesser	m
E	Elastizitätsmodul	N/m^2
E_s	tatsächlicher Elastizitätsmodul	N/m^2
F	Kraft zwischen zwei parallelen langen Leitern während eines Kurzschlusses	N
F_d	Kraft auf den Stützpunkt bei biegesteifen Leitern (Spitzenwert)	N
F_f	Fall-Seilzugkraft in einem Hauptleiter	N
F_m	Kraft zwischen den Hauptleitern während eines Kurzschlusses	N
F_{m2}	Kraft zwischen den Hauptleitern während eines zweipoligen Kurzschlusses	N
F_{m3}	Kraft auf den mittleren Hauptleiter während eines symmetrischen dreipoligen Kurzschlusses	N
F_s	Kraft zwischen den Teilleitern während eines Kurzschlusses	N
F_{st}	statische Seilzugkraft in einem Hauptleiter	N
F_t	Kurzschluss-Seilzugkraft in einem Hauptleiter	N
F_{pi}	Bündel-Seilzugkraft in einem Hauptleiter	N
F'	charakteristischer elektromagnetischer Kraftbelag auf den Hauptleiter in Seilanordnungen	N/m
F_v	Kurzschluss-Stromkraft zwischen den Teilleitern eines Bündels	N
f	Frequenz des Stromkreises	Hz
f_c	maßgebliche Eigenfrequenz eines Hauptleiters	Hz
f_{cs}	maßgebliche Eigenfrequenz eines Teilleiters	Hz

Formelzeichen	Bedeutung	SI-Einheit
h_d	Schlaufenhöhe	m
g_n	Normfallbeschleunigung	m/s ²
I''_{k1}	Anfangs-Kurzschlusswechselstrom beim einpoligen Kurzschluss (Effektivwert)	A
I''_{k2}	Anfangs-Kurzschlusswechselstrom beim zweipoligen Kurzschluss (Effektivwert)	A
I''_{k3}	Anfangs-Kurzschlusswechselstrom beim dreipoligen Kurzschluss (Effektivwert)	A
i_p	Stoßkurzschlussstrom	A
i_{p2}	Stoßkurzschlussstrom beim zweipoligen Kurzschluss	A
i_{p3}	Stoßkurzschlussstrom beim dreipoligen Kurzschluss	A
I_{th}	thermisch gleichwertiger Kurzschlussstrom	A
i_1, i_2	Augenblickswerte der Leiterströme	A
J	axiales Flächenmoment 2. Grades (Flächenträgheitsmoment) eines Hauptleiters	m ⁴
J_s	axiales Flächenmoment 2. Grades (Flächenträgheitsmoment) eines Teilleiters	m ⁴
j	Parameter, der die Lage der Bündelleiter während des Kurzschlussstrom-Flusses angibt	1
k	Anzahl der Abstandhalter- oder Versteifungselement-Anordnungen	1
k_{1n}	Faktor für den wirksamen Leiterabstand zwischen Teilleiter 1 und Teilleiter n	1
k_{1s}	Faktor für den wirksamen Leiterabstand zwischen Teilleiter 1 und Teilleiter s	1
K_d	diagonaler Abstand zwischen den zwei Befestigungspunkten einer Schlaufe	m
l	Leiterabstand von Stützpunkten	m
l_c	Seillänge eines Hauptleiters im Spannungsfeld	m
l_d	Seil(bogen)länge der Schlaufe	m
l_i	Länge einer Abspann-Isolatorkette	m
l_s	Leiterabstand der Zwischenstücke oder Leiterabstand eines Zwischenstückes und des benachbarten Stützpunkts	m
m'	Massenbelag eines Hauptleiters	kg/m
m'_s	Massenbelag eines Teilleiters	kg/m
m_z	Gesamtmasse einer Zwischenstück-Anordnung	kg
N	Steifigkeitsnorm einer Anordnung mit Leiterseilen	1/N
n	Anzahl der Teilleiter eines Hauptleiters	1
q	Faktor der Plastizität	1
R_p	Streckgrenze	N/m ²
r	Verhältnis von elektromagnetischer Kraft auf ein Leiterseil bei Kurzschluss zur Eigengewichtskraft	1

Formel- zeichen	Bedeutung	SI-Einheit
S	resultierender Federkoeffizient der beiden Stützpunkte eines Spannungsfelds	N/m
s	Wanddicke bei Rohrleitern	m
S_{th}	thermisch gleichwertige Kurzschlussstromdichte	A/m ²
S_{thr}	Bemessungs-Kurzzeitstromdichte	A/m ²
T	Periodendauer der Spannungsfeld-Pendelung	s
T_k	Kurzschlussdauer	s
T_{k1}	Dauer des ersten Kurzschlussstrom-Flusses	s
T_{ki}	Einzelne Stromflusszeit i bei wiederholten Kurzschlüssen	s
T_{kr}	Bemessungs-Kurzschlusszeit	s
T_{res}	resultierende Periodendauer der Spannungsfeld-Pendelung während des Kurzschlussstrom-Flusses	s
V_F	Verhältnis von dynamischer zu statischer Kraft auf den Stützpunkt	1
V_r	Verhältnis von dynamischen Beanspruchungen (Kraft auf den Stützpunkt, Hauptleiter-Biegespannungsbeitrag) durch die Kräfte zwischen Hauptleitern bei erfolgloser dreipoliger Automatischer Wiedereinschaltung zu den dynamischen Beanspruchungen bei erfolgreicher dreipoliger Automatischer Wiedereinschaltung	1
V_{rs}	Verhältnis des dynamischen Biegespannungsbeitrags durch die Kräfte zwischen Teilleitern bei erfolgloser dreipoliger Automatischer Wiedereinschaltung zum dynamischen Biegespannungsbeitrag bei erfolgreicher dreipoliger Automatischer Wiedereinschaltung	1
V_σ	Verhältnis vom dynamischen zum statischen Hauptleiter-Biegespannungsbeitrag	1
$V_{\sigma s}$	Verhältnis vom dynamischen zum statischen Teilleiter-Biegespannungsbeitrag	1
Z	Widerstandsmoment des Hauptleiters	m ³
Z_s	Widerstandsmoment eines Teilleiters	m ³
α	Faktor für die Kraft auf einen Stützpunkt	1
β	Faktor für die Hauptleiterbeanspruchung	1
γ	Faktor für die Bestimmung der maßgeblichen Eigenfrequenz	1
δ_1	Richtung der resultierenden Kraft	°
δ_k	Ausschwingwinkel am Ende des Kurzschlussstrom-Flusses	°
δ_m	maximaler Ausschwingwinkel	°
δ_{max}	tatsächlicher maximaler Ausschwingwinkel infolge der Begrenzung der Ausschwingbewegung durch die Schlaufe	°
ε_{ela}	elastische Seildehnung	1
$\varepsilon_{pi}, \varepsilon_{st}$	Dehnungsfaktoren bei der Kontraktion eines Seilbündels	1
ε_{th}	thermische Seildehnung	1
ζ	Beanspruchungsfaktor des Hauptleiters in Seilanordnungen	1
η	Faktor zur Berechnung von F_{pi} bei nicht zusammenschlagenden Bündelleitern	1
θ_b	Temperatur des Stromleiters bei Kurzschlussbeginn	°C

Formelzeichen	Bedeutung	SI-Einheit
θ_e	Temperatur des Stromleiters bei Kurzschlussende	°C
κ	Faktor zur Berechnung des Stoßkurzschlussstroms	1
μ_0	magnetische Feldkonstante, Permeabilität des leeren Raumes	Vs/(Am)
ν	Anzahl der Felder eines durchlaufenden Trägers	1
$\nu_e, \nu_1, \nu_2, \nu_3, \nu_4$	Faktoren zur Berechnung von F_{pi}	1
ξ	Faktor zur Berechnung von F_{pi} bei zusammenschlagenden Bündelleitern	1
σ_{fin}	niedrigste Spannung, ab der der Elastizitätsmodul konstant wird	N/m ²
σ_m	Biegespannung durch die Kräfte zwischen den Hauptleitern	N/m ²
σ_s	Biegespannung durch die Kräfte zwischen den Teilleitern	N/m ²
σ_{tot}	gesamte Biegespannung im Leiter	N/m ²
χ	Größe zur Berechnung des maximalen Ausschwingwinkels	1
φ, ψ	Faktoren für die Berechnung der Zugkraft in Leiterseilen	1

4 Allgemeines

Mit den Rechenverfahren dieser Norm können berechnet werden:

- Spannungen in biegesteifen Leitern;
- Zugkräfte in Leiterseilen;
- Kräfte auf Isolatoren und Unterkonstruktionen, die hierdurch auf Biegung, Zug und/oder Druck beansprucht werden;
- Seilauslenkungen;
- Erwärmung von Leitern.

Ströme in Leitern rufen elektromagnetische Kräfte auf diese Leiter hervor. Wo elektromagnetische Kräfte zwischen parallelen Leitern wirken, verursachen sie die in Anlagen zu beachtenden Beanspruchungen. Deshalb

- werden in den folgenden Abschnitten die Kräfte zwischen parallelen Leitern angegeben;
- brauchen im allgemeinen die elektromagnetischen Kraftanteile, die durch abgewinkelte und/oder sich kreuzende Leitern auftreten, nicht beachtet zu werden.

Bei metallgekapselten Anlagen kann die durch die Abschirmung gegebene Änderung der elektromagnetischen Kräfte zwischen den Hauptleitern berücksichtigt werden. Zusätzlich ist jedoch die Kraftwirkung zwischen jedem Leiter und seiner Kapselung bzw. zwischen den Kapselungen zu beachten.

Ist die Länge der parallelen Leiter wesentlich größer als ihr Abstand, so wirken die Kräfte gleichmäßig verteilt auf die Leiter und ergeben sich aus der Gleichung

$$F = \frac{\mu_0}{2\pi} i_1 i_2 \frac{l}{a} \quad (1)$$

Dabei ist

- i_1, i_2 Augenblickswerte der Leiterströme
- l Mittenabstand der Stützpunkte
- a Leitemittenabstand

Bei gleicher Stromrichtung in beiden Leitern sind die Kräfte anziehend, bei entgegengesetzter Stromrichtung sind die Kräfte abstoßend.

5 Anordnungen mit biegesteifen Leitern

5.1 Allgemeines

Biegesteife Leiter können verschieden befestigt sein, entweder eingespannt oder gestützt oder in Kombination von beidem. Abhängig von der Art und der Anzahl der Stützpunkte werden die Spannungen in den Leitern und die Kräfte auf die Stützpunkte bei gleichem Kurzschlussstrom verschieden sein. Die angegebenen Gleichungen decken auch die Elastizität der Stützpunkte ab.

Die Spannungen in den Leitern und die Kräfte auf die Stützpunkte hängen außerdem vom Verhältnis der maßgeblichen Eigenfrequenz des mechanischen Systems zur Frequenz des Stromkreises ab. Zum Beispiel können bei Resonanz oder nahe der Resonanz die Spannungen und Kräfte anwachsen. Bei $f_c / f < 0,5$ nimmt die Beanspruchung ab, und die größte Beanspruchung tritt in den äußeren Hauptleitern auf.

5.2 Berechnung der elektromagnetischen Kräfte

5.2.1 Berechnung des Spitzenwerts der Kraft zwischen den Hauptleitern bei dreipoligem Kurzschluss

In einer Drehstromanlage, bei der die Hauptleiter in gleichem Mittenabstand in einer Ebene angeordnet sind, greift die höchste Kraft während eines dreipoligen Kurzschlusses am mittleren Hauptleiter an und beträgt

$$F_{m3} = \frac{\mu_0}{2\pi} \frac{\sqrt{3}}{2} i_{p3}^2 \frac{l}{a_m} \quad (2)$$

Dabei ist

- i_{p3} Stoßkurzschlussstrom des symmetrischen dreipoligen Kurzschlusses; zur Berechnung siehe IEC 60909
- l größter vorkommender Mittenabstand der Stützpunkte
- a_m wirksamer Hauptleiterabstand nach 5.3

ANMERKUNG Gleichung (2) kann ebenso zur Berechnung des Spitzenwerts der Kraft angewendet werden, wenn Leiter mit Kreisquerschnitt in den Eckpunkten eines gleichseitigen Dreiecks liegen und a_m hierbei die Seitenlänge des Dreiecks ist.

5.2.2 Berechnung des Spitzenwerts der Kraft zwischen den Hauptleitern bei zweipoligem Kurzschluss ohne Erdberührung

Die höchste Kraft zwischen Leitern, die vom Kurzschlussstrom bei zweipoligem Kurzschluss ohne Erdberührung in Drehstromanlagen oder bei Kurzschluss in Einphasen-2-Leiter-Anlagen durchflossen werden, beträgt

$$F_{m2} = \frac{\mu_0}{2\pi} i_{p2}^2 \frac{l}{a_m} \quad (3)$$

Dabei ist

- i_{p2} Stoßkurzschlussstrom des zweipoligen Kurzschlusses ohne Erdberührung
- l größter vorkommender Mittenabstand der Stützpunkte
- a_m wirksamer Hauptleiterabstand nach 5.3

5.2.3 Berechnung des Spitzenwerts der Kraft zwischen in gleicher Ebene angeordneten Teilleitern

Die höchste Kraft wirkt auf die äußeren Teilleiter und beträgt zwischen zwei benachbarten Zwischenstücken

$$F_s = \frac{\mu_0}{2\pi} \left(\frac{i_p}{n} \right)^2 \frac{l_s}{a_s} \quad (4)$$

Dabei ist

- n Anzahl der Teilleiter
- l_s größter Mittenabstand zweier benachbarter Zwischenstücke
- a_s wirksamer Abstand zwischen den Teilleitern
- i_p gleich i_{p3} in Drehstromanlagen oder i_{p2} in Einphasen-2-Leiter-Anlagen

5.3 Wirksame Abstände zwischen Hauptleitern und zwischen Teilleitern

Die Kräfte zwischen Leitern, die vom Kurzschlussstrom durchflossen werden, sind abhängig von der geometrischen Anordnung und dem Profil der Leiter. Deshalb ist in 5.2.1 und 5.2.2 der wirksame Abstand a_m zwischen Hauptleitern und in 5.2.3 der wirksame Abstand a_s zwischen Teilleitern eingeführt. Sie sind wie folgt zu ermitteln:

Wirksamer Abstand a_m zwischen Hauptleitern in gleicher Ebene mit dem Leitermittenabstand a :

- Hauptleiter bestehend aus Einzelleitern mit Kreisprofil:

$$a_m = a \quad (5)$$

- Hauptleiter bestehend aus Einzelleitern mit Rechteckprofil und Hauptleiter zusammengesetzt aus Teilleitern mit Rechteckprofil:

$$a_m = \frac{a}{k_{12}} \quad (6)$$

k_{12} ist dem Bild 1 zu entnehmen mit $a_{1s} = a$, $b = b_m$ und $d = d_m$.

Wirksamer Abstand a_s zwischen den in gleicher Ebene liegenden n Teilleitern eines Hauptleiters:

- Teilleiter mit Kreisprofil:

$$\frac{1}{a_s} = \frac{1}{a_{12}} + \frac{1}{a_{13}} + \frac{1}{a_{14}} + \dots + \frac{1}{a_{1s}} + \dots + \frac{1}{a_{1n}} \quad (7)$$

- Teilleiter mit Rechteckprofil:

Einige Werte für a_s sind in Tabelle 1 angegeben. Für andere Abstände und Teilleiterabmessungen kann die Gleichung

$$\frac{1}{a_s} = \frac{k_{12}}{a_{12}} + \frac{k_{13}}{a_{13}} + \frac{k_{14}}{a_{14}} + \dots + \frac{k_{1s}}{a_{1s}} + \dots + \frac{k_{1n}}{a_{1n}} \quad (8)$$

verwendet werden. Die Werte für k_{12} , ..., k_{1n} sind dem Bild 1 zu entnehmen.

5.4 Berechnung der Spannungen in biegesteifen Leitern

5.4.1 Berechnung der Spannungen

Die Leiter sind so zu befestigen, dass die Axialkräfte vernachlässigt werden dürfen. Unter dieser Voraussetzung sind die angreifenden Kräfte Biegekräfte, und die allgemeine Gleichung für die Biegespannung hervorgerufen durch die Kräfte zwischen den Hauptleitern lautet

$$\sigma_m = V_\sigma V_r \beta \frac{F_m l}{8Z} \quad (9)$$

Für F_m ist bei Drehstromanlagen F_{m3} nach Gleichung (2), bei Einphasen-2-Leiter-Anlagen F_{m2} nach Gleichung (3) einzusetzen.

Z ist das Widerstandsmoment des Hauptleiters. Es ist bezüglich der Kräfte zwischen den Hauptleitern zu berechnen.

Die Biegespannung hervorgerufen durch die Kräfte zwischen den Teilleitern beträgt

$$\sigma_s = V_{\sigma s} V_{rs} \frac{F_s l_s}{16Z_s} \quad (10)$$

worin F_s nach Gleichung (4) einzusetzen ist.

Z_s ist das Widerstandsmoment eines Teilleiters. Es ist bezüglich der Kräfte zwischen den Teilleitern zu berechnen.

V_σ , $V_{\sigma s}$, V_r und V_{rs} sind Faktoren, die die Dynamik berücksichtigen, und β ein Faktor abhängig von der Art und der Anzahl der Stützpunkte. Die größtmöglichen Werte $V_\sigma V_r$, $V_{\sigma s} V_{rs}$ sind der Tabelle 2 und der Faktor β ist der Tabelle 3 zu entnehmen.

ANMERKUNG Der Faktor β beschreibt die Verringerung der Biegespannung an Einspannstellen bei Berücksichtigung der plastischen Verformung des Leiters, siehe Tabelle 3.

Ungleiche Stützabstände bei durchlaufenden Mehrfeldträgern dürfen mit ausreichender Genauigkeit so behandelt werden, als sei der größte Stützabstand überall vorhanden. Dies bedeutet:

- die Endstützpunkte werden nicht höher beansprucht als die inneren Stützpunkte;
- Stützabstände von weniger als 20 % der benachbarten Stützabstände sind zu vermeiden. Ist dies nicht möglich, sind die Leiter durch Gelenke in den Stützpunkten zu entkoppeln. Bei Gelenken innerhalb eines Feldes sollte die Länge dieses Feldes kleiner als 70 % der Länge der benachbarten Felder sein.

Wenn unklar ist, ob ein Träger als gestützt oder als eingespannt gelten kann, so ist für die Bemessung der ungünstigere Fall zugrunde zu legen.

Weitere Überlegungen siehe 5.7.

5.4.2 Widerstandsmoment und Faktor q von Hauptleitern, die aus Teilleitern zusammengesetzt sind

Die Biegespannung und damit die mechanische Festigkeit des Leiters hängen vom Widerstandsmoment ab.

Tritt die Beanspruchung entsprechend Bild 2a auf, so ist das Widerstandsmoment Z unabhängig von der Anzahl der Zwischenstücke und gleich der Summe der Widerstandsmomente Z_s der Teilleiter (Z_s bezüglich der Achse $x - x$). Der Faktor q ist dann $q = 1,5$ für Rechteckprofile und $q = 1,19$ für U- und I-Profile.

Tritt die Beanspruchung entsprechend Bild 2b auf und ist kein oder nur ein Versteifungselement innerhalb eines Stützabstands vorhanden, so ist das Widerstandsmoment Z gleich der Summe der Teilleiter-Wider-

E DIN IEC 60865-1 (VDE 0103):2009-03

standsmomente Z_s (Z_s bezüglich der Achse $y - y$). Der Faktor q ist dann $q = 1,5$ für Rechteckprofile und $q = 1,83$ für U- und I-Profile.

Sind innerhalb eines Stützabstands zwei oder mehr Versteifungselemente vorhanden, darf mit größeren Werten der Widerstandsmomente gerechnet werden:

- bei Hauptleitern aus Teilleitern mit Rechteckprofil und einem Abstand zwischen den Teilleitern etwa gleich der Schienendicke sind die Widerstandsmomente in Tabelle 5 angegeben;
- bei aus U- und I-Profilen zusammengesetzten Hauptleitern sollten 50 % der für die Achse 0 - 0 geltenden Widerstandsmomente eingesetzt werden.

Der Faktor q ist dann $q = 1,5$ für Rechteckprofile und $q = 1,83$ für U- und I-Profile.

5.4.3 Zulässige Leiterspannung

Ein Einzelleiter gilt als kurzschlussfest, wenn

$$\sigma_m \leq q R_{p0,2} \quad (11)$$

wobei $R_{p0,2}$ die Streckgrenze des Leiters ist.

Der Faktor q ist der Tabelle 4 zu entnehmen, siehe auch 5.4.2.

ANMERKUNG Der Faktor q nach Tabelle 4 und 5.4.2 beschreibt die Erhöhung der zulässigen Belastbarkeit des Leiters infolge seines plastischen Verhaltens außerhalb der Befestigungsstellen unter Berücksichtigung des Leiterprofils.

Besteht ein Leiter aus zwei oder mehr Teilleitern, so gilt für die gesamte Spannung im Leiter

$$\sigma_{\text{tot}} = \sigma_m + \sigma_s \quad (12)$$

Der Leiter gilt als kurzschlussfest, wenn

$$\sigma_{\text{tot}} \leq q R_{p0,2} \quad (13)$$

Es muss sichergestellt sein, dass der Kurzschluss den Abstand zwischen den Teilleitern nicht zu sehr verändert, deshalb wird

$$\sigma_s \leq R_{p0,2} \quad (14)$$

empfohlen.

In Tabelle 4 sind die zulässigen Werte für q bei verschiedenen Profilen angegeben. Bei $\sigma_m = q R_{p0,2}$ bzw. $\sigma_{\text{tot}} = q R_{p0,2}$ können geringe bleibende Durchbiegungen bis zu 1 % des Stützabstands für q nach Tabelle 4 auftreten, die jedoch die Betriebssicherheit nicht beeinträchtigen, solange hierdurch nicht Mindestabstände zwischen den Hauptleitern oder zwischen einem Hauptleiter und geerdeten Teilen unterschritten werden.

ANMERKUNG 1 Für die Streckgrenze $R_{p0,2}$ von Leiterwerkstoffen werden oftmals in den Normen Bereiche mit Mindest- und Höchstwerten angegeben. Falls nur solche Grenzwerte statt tatsächlicher Größen verfügbar sind, ist der Mindestwert in 5.4.3 und der Höchstwert in Tabelle 2 einzusetzen.

ANMERKUNG 2 Eine mögliche statische Vorbelastung im Leiter, z. B. verursacht durch dessen Eigengewicht, ist in den Gleichungen (11) bis (14) nicht enthalten. Sie muss gegebenenfalls mit den Kurzschlussbelastungen entsprechend ihrer Wirkungsrichtung kombiniert werden.

5.5 Belastung der Stützpunkte durch biegesteife Leiter

Die auf die Stützpunkte biegesteifer Leiter wirkende statische Ersatzlast F_d ist zu berechnen mit

$$F_d = V_F V_r \alpha F_m \quad (15)$$

Für F_m ist bei Drehstromanlagen F_{m3} nach Gleichung (2), bei Einphasen-2-Leiter-Anlagen F_{m2} nach Gleichung (3) einzusetzen.

Die größtmöglichen Werte von $V_F V_r$ sind Tabelle 2 zu entnehmen.

Der Faktor α ist abhängig von der Art und der Anzahl der Stützpunkte und ist Tabelle 3 zu entnehmen.

Weitere Überlegungen siehe 5.7.

Die Kraft F_d darf nicht größer sein als der Bemessungswert der Festigkeit, der von den Herstellern der Unterkonstruktionen und Isolatoren angegeben wird. Bei durch Biegekräfte beanspruchten Isolatoren wird der Bemessungswert der Festigkeit als eine am Isolatorkopf angreifende Kraft angegeben.

ANMERKUNG Für eine an einem Punkt oberhalb des Isolatorkopfs angreifende Kraft ist der zulässige Bemessungswert entsprechend dem maximal zulässigen Biegemoment im gefährdeten Querschnitt des Isolators zu reduzieren.

5.6 Berücksichtigung der Automatischen Wiedereinschaltung

Automatische Wiedereinschaltung ist bei biegesteifen Leitern zu berücksichtigen, wenn dreipolige Automatische Wiedereinschaltung eingesetzt wird.

Bei Netzen mit dreipoliger Automatischer Wiedereinschaltung treten während des ersten und des zweiten Stromflusses unterschiedliche Spannungen in den Leitern auf. Somit können sich auch unterschiedliche Kräfte auf die Stützpunkte während der beiden Stromflüsse ergeben. Daher ist die dynamische Kraft F_d wie folgt zu ermitteln:

- Berechnung von α_{tot} nach 5.4 mit $V_\sigma V_r$, $V_{\text{os}} V_{\text{rs}}$ aus Tabelle 2 für die 1. Stromflussdauer und Bestimmung von $V_F V_r$ mit Tabelle 2;
- Berechnung von α_{tot} nach 5.4 mit $V_\sigma V_r$, $V_{\text{os}} V_{\text{rs}}$ aus Tabelle 2 für die 2. Stromflussdauer und Bestimmung von $V_F V_r$ mit Tabelle 2;
- Berechnung von F_d nach Gleichung (15) mit dem Maximum von $V_F V_r$ aus beiden Stromflüssen.

5.7 Berechnung unter besonderer Berücksichtigung der Leitterschwingung

5.7.1 Allgemeines

Die Gleichungen in 5.4.1 und 5.5 enthalten Faktoren V_σ , V_{os} , V_F , V_r und V_{rs} , mit denen der Zeitverlauf der Spannungen und Kräfte erfasst wird.

Die oberen Grenzwerte dieser Faktoren gibt Tabelle 2 an. Kleinere Werte als nach Tabelle 2 sind zulässig, wenn sie anhand dieses Abschnitts ermittelt sind. Dazu ist die Bestimmung der maßgeblichen Eigenfrequenz f_c erforderlich, wobei die Genauigkeit der Daten zu beachten ist.

5.7.2 Bestimmung der maßgeblichen Eigenfrequenz

Die maßgebliche Eigenfrequenz eines Leiters kann bestimmt werden mit

$$f_c = \frac{\gamma}{l^2} \sqrt{\frac{E J}{m'}} \quad (16)$$

Gleichung (16) ist anzuwenden bei Hauptleitern, die aus einem Einzelleiter bestehen.

Der Faktor γ ist abhängig von der Art und der Anzahl der Stützpunkte und in Tabelle 3 angegeben.

ANMERKUNG Bei über drei oder mehr Felder durchlaufenden Trägern wird die maßgebliche Eigenfrequenz mit Gleichung (16) geringfügig zu hoch ermittelt. Eine genaue Berechnung ist nur mit Aufwand möglich. Daher wird empfohlen, Gleichung (16) zu verwenden.

Besteht ein Hauptleiter aus Teilleitern mit Rechteckprofil, so ist die maßgebliche Eigenfrequenz des Hauptleiters zu bestimmen mit

$$f_c = c \frac{\gamma}{l^2} \sqrt{\frac{E J_s}{m'_s}} \quad (17)$$

Der Faktor c ist den Bildern 3b) und 3c) zu entnehmen. Wenn keine Zwischenstücke vorhanden sind gilt $c = 1$.

Bei einem Hauptleiter, der aus Teilleitern mit U- oder I-Profilen besteht, ist f_c nach Gleichung (16) zu berechnen; J und m' beziehen sich auf den Hauptleiter.

Für die Berechnung der Teilleiterspannungen ist die maßgebliche Eigenfrequenz zu berechnen mit

$$f_{cs} = \frac{3,56}{l_s^2} \sqrt{\frac{E J_s}{m'_s}} \quad (18)$$

ANMERKUNG Die axialen Flächenmomente 2. Grades J und J_s werden entsprechend der Bilder 2a) oder 2b) berechnet.

5.7.3 Die Faktoren V_F , V_σ , $V_{\sigma s}$, V_r und V_{rs}

Die Faktoren V_F , V_σ , $V_{\sigma s}$, V_r und V_{rs} als Funktionen der Verhältnisse f_c/f und f_{cs}/f , wobei f die Frequenz des Stromkreises ist, unterscheiden sich geringfügig, je nachdem, ob ein dreipoliger oder ein zweipoliger Kurzschluss betrachtet wird. Außerdem sind sie abhängig von der mechanischen Dämpfung der Anordnung. Für praktische Berechnungen sind die Faktoren V_F , V_σ und $V_{\sigma s}$ dem Bild 4 zu entnehmen.

ANMERKUNG 1 Kurzschlusszeiten $T_{k1} \leq 0,1$ s können bei Anlagen mit $f_c/f \leq 1$ zu beachtlichen Beanspruchungsverminderungen führen.

ANMERKUNG 2 Bei elastischen Stützpunkten ist die maßgebliche Eigenfrequenz niedriger als nach Gleichung (16) ermittelt. Dies ist bei der Anwendung von Bild 4 zu beachten, wenn f_c/f größer als 2,4 ist.

Wird dreipolige Automatische Wiedereinschaltung eingesetzt, so sind die Faktoren V_r und V_{rs} dem Bild 5 zu entnehmen; andernfalls ist $V_r = 1$, $V_{rs} = 1$.

6. Anordnungen mit Leiterseilen

6.1 Allgemeines

Im Spannungsfeld ist zu unterscheiden zwischen der Seilzugkraft F_t durch das Ausschwingen der Leiter während des Kurzschlusses, der Seilzugkraft F_f nach dem Kurzschluss, wenn die Leiter in ihre Ruhelage zurückfallen, und der Seilzugkraft F_{pi} , die durch die Annäherung der Seile im Bündel verursacht wird. Die Wirkung auf horizontal angeordnete Hauptleiter werden in 6.2 ermittelt. Nach der Berechnung der für die Anordnung und den Kurzschluss charakteristischen Parameter in 6.2.1 wird in 6.2.2 die Seilzugkraft F_t ohne Schlaufen im Spannungsfeld ermittelt. Die dynamische Durchhangänderung durch Seildehnung und Änderung der Seilkurvenform wird in 6.2.3 bestimmt und danach die Seilzugkraft F_t mit Schlaufen im Spannungsfeld in 6.2.4. Die Seilzugkraft F_f nach dem Kurzschluss folgt in 6.2.5. Die horizontale Seilauslenkung b_h und der minimale Leiterabstand a_{min} beim Ausschwingen des Spannungsfeldes werden in 6.2.6 berechnet. Die Wirkung auf vertikal verlaufende Seilverbindungen bestimmt 6.3. Die Seilzugkraft F_{pi} wird in 6.4 ermittelt. Die Bemessungslasten werden in 6.5 angegeben. Die dreipolige Automatische Wiedereinschaltung wird in 6.6 behandelt.

In Anlagen mit Leiterseilen sind die Beanspruchungen bei zweipoligen Kurzschlüssen ohne Erdberührung und bei dreipoligen symmetrischen Kurzschlüssen nahezu gleich. Jedoch hat bei zweipoligen Kurzschlüssen das Ausschwingen der Leiter den begrenzenden geringsten Leiterabstand zur Folge, z. B. wenn sich die benachbarten Leiter, die den Kurzschlussstrom führen, nach dem Kurzschluss auf einander zu bewegen. Im Falle eines dreipoligen symmetrischen Kurzschlusses bewegt sich der mittlere Leiter nur gering wegen seiner Trägheit und der auf ihn von den beiden anderen Leitern entgegengesetzt wirkenden Wechselkräfte. Folglich werden F_t , F_f und b_h für den zweipoligen Kurzschluss ohne Erdberührung berechnet.

Die Seilzugkräfte F_t , F_f und F_{pi} enthalten die Seilzugkräfte durch die statische Last.

Die folgenden Berechnungen sind sowohl für die statische Seilzugkraft F_{st} bei der örtlichen Tiefsttemperatur im Winter, z. B. -20 °C , als auch für die statische Seilzugkraft F_{st} bei der höchsten Betriebstemperatur, z. B. 60 °C , durchzuführen. Für jede Seilzugkraft ist der höhere Wert der Bemessung zugrunde zu legen.

6.2 Wirkung auf horizontal angeordnete Hauptleiter

Die folgenden Abschnitte gelten für Einzelleiter und regelmäßige Bündelleiteranordnungen, bei denen die Mittelpunkte der Teilleiter auf einem Kreisbogen mit gleichem Abstand zwischen benachbarten Teilleitern liegen.

Zusätzlich zu den hier berechneten Beanspruchungen sind die Teilleiterbeanspruchungen gemäß 6.4 zu berechnen. Es werden Anordnungen ohne und mit Schlaufe innerhalb des Feldes betrachtet.

Die nachstehenden Abschnitte gelten für horizontal nebeneinander liegende Leiterseile. In anderen Anordnungen können niedrigere Seilzugkräfte auftreten. Wegen der aufwändigen Berechnung wird jedoch empfohlen, auch in diesen Fällen die angegebenen Gleichungen zu verwenden. Bei einem Höhenunterschied der Befestigungspunkte von mehr als 25 % der Spannungsfeldlänge ist nach 6.3 zu rechnen.

ANMERKUNG 1 Die nachstehenden Gleichungen gelten für Spannungsfeldlängen bis etwa 120 m und Verhältnissen von Durchhang zu Spannungsfeldlänge bis etwa 8 %. Bei längeren Spannungsfeldern kann infolge der Leiterbewegung die Beanspruchung niedriger sein, als hier ermittelt wird. Falls dies durch ausführlichere Rechenverfahren oder Messungen nachgewiesen wird, dürfen geringere Seilzugkräfte berücksichtigt werden.

ANMERKUNG 2 Schlaufen in der Nähe der Hauptleiterbefestigungen haben geringen Einfluss auf die Seilzugkräfte und die Bewegung des Hauptleiters. Es wird empfohlen, in diesem Fall die Berechnung nach 6.2 ohne Berücksichtigung der Schlaufen auszuführen.

ANMERKUNG 3 Bei der Ermittlung der statischen Seilzugkraft F_{st} und des statischen Durchhangs b_{c0} sollte der Beitrag konzentrierter Massen im Spannungsfeld z. B. durch Klemmen, Schlaufen oder Gegenkontakte berücksichtigt werden. Bei Schlaufen ist dabei die Hälfte der Schlaufenmasse anzusetzen. Bei der Ermittlung der Kurzschlusskräfte F_t und F_f und der maximalen horizontalen Seilauslenkung b_h wird die Summe der vorhandenen konzentrierten Massen in einen zusätzlichen Massenbelag über die Spannungsfeldlänge umgerechnet, die Masse der Seilschlaufe in Spannungsfeldmitte und ihrer Befestigung jedoch nicht berücksichtigt.

6.2.1 Charakteristische Größen und Parameter

Der charakteristische elektromagnetische Kraftbelag auf den Hauptleiter eines Drehstromsystems berechnet sich

- bei Stromfluss über die gesamte Seillänge des Hauptleiters im Spannungsfeld ohne und mit Schlaufe mit

$$F' = \frac{\mu_0}{2\pi} 0,75 \frac{(I_{k3}'')^2}{a} \frac{l_c}{l} \quad (19a)$$

- bei Stromfluss über die halbe Seillänge des Hauptleiters im Spannungsfeld und über die Schlaufe mit

$$F' = \frac{\mu_0}{2\pi} 0,75 \frac{(I_{k3}'')^2}{a} \frac{l_c/2 + l_d/2}{l} \quad (19b)$$

Dabei ist

I_{k3}'' Anfangs-Kurzschlusswechselstrom (Effektivwert) beim dreipoligen Kurzschluss

a Abstand zwischen den Hauptleiter-Mittelpunkten

l_c Seillänge eines Hauptleiters im Spannungsfeld

l_d Seillänge der Schlaufe

Bei Feldern mit aufgelegten Seilen, die Stützisolatoren auf Biegung beanspruchen, gilt $l_c = l$. Bei Feldern mit abgespannten Seilen gilt $l_c = l - 2 l_i$, dabei ist l_i die Länge einer Abspann-Isolatorreihe.

In Einphasen-2-Leiter-Anlagen ist $0,75 (I_{k3}'')^2$ in Gleichung (19) durch $(I_{k2}'')^2$ zu ersetzen.

ANMERKUNG Das Berechnungsverfahren berücksichtigt nicht die Wirkung der aperiodischen Komponente des Kurzschlussstroms. Sie beeinflusst das Ergebnis nur dann wesentlich, wenn die Kurzschlussstromdauer kleiner als 0,1 s ist. In diesem Fall wird auf [1] verwiesen.

Das Verhältnis von elektromagnetischem Kraftbelag auf einen Leiter bei Kurzschluss zu seinem Eigengewichtskraftbelag

$$r = \frac{F'}{n m_s' g_n} \quad (20)$$

ist ein wesentlicher Parameter und führt auf die Richtung der resultierenden Kraft auf den Leiter

$$\delta_1 = \arctan r \quad (21)$$

Der statische Ersatz-Seildurchhang in Spannungsfeldmitte wird berechnet mit

$$b_c = \frac{n m_s' g_n l^2}{8 F_{st}} \quad (22)$$

Die Periodendauer T der Leiterschwingung wird berechnet mit

$$T = 2\pi \sqrt{0,8 \frac{b_c}{g_n}} \quad (23)$$

und gilt für kleine Ausschwingwinkel ohne Stromfluss im Leiter.

Die resultierende Periodendauer T_{res} des während des Kurzschlussstrom-Flusses ausschlagenden Leiterseils wird berechnet mit

$$T_{\text{res}} = \frac{T}{\sqrt[4]{1+r^2} \left[1 - \frac{\pi^2}{64} \left(\frac{\delta_1}{90^\circ} \right)^2 \right]} \quad (24)$$

worin δ_1 in Grad einzusetzen ist.

Die Steifigkeitsnorm beträgt

$$N = \frac{1}{S l} + \frac{1}{n E_s A_s} \quad (25)$$

ANMERKUNG 1 Ist der genaue Wert von S für aufgelegte Seile, die Stützisolatoren auf Biegung beanspruchen, nicht bekannt, so sollte $S = 100 \cdot 10^3 \text{ N/m}$ in Gleichung (25) eingesetzt werden.

ANMERKUNG 2 Für Gerüste, an denen Seile mit Isolator Ketten abgespannt sind, können folgende Bereiche angegeben werden:

$150 \cdot 10^3 \text{ N/m}$ bis $1300 \cdot 10^3 \text{ N/m}$ bei Bemessungsspannung 123 kV

$600 \cdot 10^3 \text{ N/m}$ bis $3500 \cdot 10^3 \text{ N/m}$ bei Bemessungsspannung 420 kV

In Gleichung (25) ist S der resultierende Federkoeffizient beider Abspanngerüste.

E_s ist der tatsächliche Elastizitätsmodul

$$E_s = \begin{cases} E \left[0,3 + 0,7 \sin \left(\frac{F_{\text{st}}}{n A_s \sigma_{\text{fin}}} 90^\circ \right) \right] & \text{für } \frac{F_{\text{st}}}{n A_s} \leq \sigma_{\text{fin}} \\ E & \text{für } \frac{F_{\text{st}}}{n A_s} > \sigma_{\text{fin}} \end{cases} \quad (26)$$

Dabei ist

$$\sigma_{\text{fin}} = 50 \cdot 10^6 \frac{\text{N}}{\text{m}^2} \quad (27)$$

σ_{fin} ist der niedrigste Wert von σ , ab dem der Elastizitätsmodul konstant wird. Der Endwert E des Elastizitätsmoduls für verseilte Leiter ist einzusetzen.

Der Beanspruchungsfaktor ζ des Hauptleiters wird berechnet mit

$$\zeta = \frac{(n g_n m'_s l)^2}{24 F_{\text{st}}^3 N} \quad (28)$$

Während oder am Ende des Kurzschlussstrom-Flusses ist das Spannungsfeld aus der Ruhelage ausgeschlagen bis zum Winkel

$$\delta_k = \begin{cases} \delta_1 \left[1 - \cos \left(360^\circ \frac{T_{k1}}{T_{\text{res}}} \right) \right] & \text{für } 0 \leq \frac{T_{k1}}{T_{\text{res}}} \leq 0,5 \\ 2 \delta_1 & \text{für } \frac{T_{k1}}{T_{\text{res}}} > 0,5 \end{cases} \quad (29)$$

Sofern die erste Stromflussdauer T_{k1} entsprechend 3.1.12 bekannt ist, darf der maximale Ausschlagwinkel δ_m mit Bild 6 oder den nachstehenden Gleichungen bestimmt werden. Andernfalls, oder wenn T_{k1} den Wert $0,4 T$ übersteigt, ist für T_{k1} in den Gleichungen (29), (32) und (35) der Wert $0,4 T$ zu setzen.

Während oder nach dem Ende des Kurzschlussstrom-Flusses ist das Spannfeld ohne Schlaufe bis zum maximalen Ausschwingwinkel δ_m ausgeschwungen. Ihn erhält man mit

$$\chi = \begin{cases} 1 - r \sin \delta_k & \text{für } 0 \leq \delta_k \leq 90^\circ \\ 1 - r & \text{für } \delta_k > 90^\circ \end{cases} \quad (30)$$

aus

$$\delta_m = \begin{cases} 1,25 \arccos \chi & \text{für } 0,766 \leq \chi \leq 1 \\ 10^\circ + \arccos \chi & \text{für } -0,985 \leq \chi \leq 0,766 \\ 180^\circ & \text{für } \chi < -0,985 \end{cases} \quad (31)$$

ANMERKUNG Der berechnete Ausschwingwinkel δ_m ist der Höchstwert, der im ungünstigsten Fall auftreten kann, wenn die tatsächliche Kurzschlussdauer kleiner oder gleich der vorgegebenen Kurzschlussdauer T_{k1} ist.

6.2.2 Seilzugkraft F_t während des Kurzschlusses durch das Ausschwingen (Kurzschluss-Seilzugkraft) ohne Schlaufe in Spannfeldmitte

Der Lastparameter φ wird berechnet mit

$$\varphi = \begin{cases} 3 \left(\sqrt{1 + r^2} - 1 \right) & \text{für } T_{k1} \geq T_{res} / 4 \\ 3 \left(r \sin \delta_k + \cos \delta_k - 1 \right) & \text{für } T_{k1} < T_{res} / 4 \end{cases} \quad (32)$$

Der Faktor ψ ist eine Funktion von ζ und φ und in Bild 7 angegeben.

Die Kurzschluss-Seilzugkraft F_t wird berechnet mit

$$F_t = F_{st} (1 + \varphi \psi) \quad (33)$$

6.2.3 Dynamische Durchhangänderung durch Seildehnung und Änderung der Seilkurvenform

Die elastische Seildehnung wird berechnet mit

$$\varepsilon_{ela} = N (F_t - F_{st}) \quad (34)$$

Die Kurzschluss-Seilzugkraft F_t wird stets für Spannfelder ohne Schlaufe in Feldmitte mit Gleichung (33) ermittelt. Bei Anordnungen mit Schlaufe in Feldmitte muss der tatsächliche maximale Ausschwingwinkel δ_{max} in 6.2.4 bestimmt werden. Hierzu ist die elastische Seildehnung für ein Spannfeld ohne Schlaufe in Feldmitte zu berechnen und F_t nach Gleichung (33) einzusetzen.

Die thermische Seildehnung wird berechnet mit

$$\varepsilon_{th} = \begin{cases} c_{th} \left(\frac{I_{k3}''}{n A_s} \right)^2 T_{res} / 4 & \text{für } T_{k1} \geq T_{res} / 4 \\ c_{th} \left(\frac{I_{k3}''}{n A_s} \right)^2 T_{k1} & \text{für } T_{k1} < T_{res} / 4 \end{cases} \quad (35)$$

Für c_{th} ist einzusetzen:

$0,27 \cdot 10^{-18} \text{ m}^4 / (\text{A}^2 \text{s})$ bei Seilen aus Aluminium, Aluminiumlegierung, Al/St mit einem Querschnittsverhältnis > 6 ;

$0,17 \cdot 10^{-18} \text{ m}^4/(\text{A}^2\text{s})$ bei Seilen aus Al/St mit einem Querschnittsverhältnis ≤ 6 ;
 $0,088 \cdot 10^{-18} \text{ m}^4/(\text{A}^2\text{s})$ bei Seilen aus Kupfer.

In Einphasen-2-Leiter-Anlagen ist I_{k3}'' in Gleichung (35) durch I_{k2}'' zu ersetzen.

Der Faktor C_D berücksichtigt die Durchhangvergrößerung infolge der elastischen und thermischen Seildehnung und wird berechnet mit

$$C_D = \sqrt{1 + \frac{3}{8} \left(\frac{l}{b_c} \right)^2 (\varepsilon_{\text{ela}} + \varepsilon_{\text{th}})} \quad (36)$$

Der Faktor C_F berücksichtigt eine mögliche Vergrößerung des dynamischen Seildurchhangs infolge einer Veränderung der Seilkurvenform und wird berechnet mit

$$C_F = \begin{cases} 1,05 & \text{für } r \leq 0,8 \\ 0,97 + 0,1 r & \text{für } 0,8 < r < 1,8 \\ 1,15 & \text{für } r \geq 1,8 \end{cases} \quad (37)$$

Der dynamische Durchhang ergibt sich mit

$$b_{\text{ct}} = C_F C_D b_c \quad (38)$$

6.2.4 Seilzugkraft F_t während des Kurzschlusses durch das Ausschwingen (Kurzschluss-Seilzugkraft) mit Schlaufe in Spannungsmitte

Schlaufen im Spannungsfeld beeinflussen die Bewegung des Hauptleiters. Entsprechend kurze Schlaufen verhindern das Ausschwingen des Hauptleiters, der maximale Ausschwingwinkel δ_m des gleichen Hauptleiters jedoch ohne Schlaufe wird dann nicht erreicht.

ANMERKUNG 1 Die Gleichungen können auch angewandt werden, wenn der obere Befestigungspunkt der Schlaufe bis zu 10 % der Länge des Hauptleiters von der Mitte entfernt ist.

ANMERKUNG 2 Alternativ zu den folgenden Gleichungen darf auch mit Abschnitt 6.2.2 gerechnet werden.

Der tatsächliche maximale Ausschwingwinkel infolge der Begrenzung der Ausschwingbewegung durch die Schlaufe ergibt sich mit Bild 8 zu

$$\delta_{\text{max}} = \text{Arc cos} \frac{(h_d + b_c)^2 + b_{\text{ct}}^2 - (l_d^2 - b_d^2)^2}{2b_{\text{ct}}(h_d + b_c)} \quad (39)$$

Dabei ist

h_d, b_d Schlaufenhöhe, Schlaufenbreite nach Bild 8
 l_d Seil(bogen)länge

Bei der Berechnung des Lastparameters φ ist zwischen folgenden Fällen zu unterscheiden:

- $\delta_{\text{max}} \geq \delta_1$:
 Das Ausschwingen des Hauptleiters wird nicht innerhalb $T_{\text{res}}/4$ durch die Schlaufe beeinflusst. Der Lastparameter φ wird berechnet mit

$$\varphi = \begin{cases} 3 \left(\sqrt{1+r^2} - 1 \right) & \text{für } T_{k1} \geq T_{\text{res}} / 4 \\ 3 \left(r \sin \delta_k + \cos \delta_k - 1 \right) & \text{für } T_{k1} < T_{\text{res}} / 4 \end{cases} \quad (40)$$

– $\delta_{\text{max}} < \delta_1$:

Das Ausschlagen des Hauptleiters wird innerhalb $T_{\text{res}} / 4$ durch die Schlaufe beeinflusst. Der Lastparameter φ wird berechnet mit

$$\varphi = \begin{cases} 3 \left(r \sin \delta_{\text{max}} + \cos \delta_{\text{max}} - 1 \right) & \text{für } \delta_k \geq \delta_{\text{max}} \\ 3 \left(r \sin \delta_k + \cos \delta_k - 1 \right) & \text{für } \delta_k < \delta_{\text{max}} \end{cases} \quad (41)$$

Der Faktor ψ ist eine Funktion von ζ und φ und in Bild 7 angegeben. Die Kurzschluss-Seilzugkraft F_t wird berechnet mit

$$F_t = F_{\text{st}} (1 + \varphi \psi) \quad (42)$$

6.2.5 Seilzugkraft F_t nach dem Kurzschluss durch das Fallen (Fall-Seilzugkraft)

Nach dem Ausschalten des Kurzschlusses schwingt das Seil oder es fällt in seine Ruhelage zurück. Der Höchstwert F_t der am Ende des Falles auftretenden Seilzugkraft ist nur zu berücksichtigen bei $r > 0,6$, wenn $\delta_m \geq 70^\circ$, und bei einer Schlaufe in Spannungsmitte außerdem $\delta_{\text{max}} \geq 60^\circ$. In diesem Fall wird die Fall-Seilzugkraft berechnet mit

$$F_t = 1,2 F_{\text{st}} \sqrt{1 + 8 \zeta \frac{\delta_m}{180^\circ}} \quad (43)$$

ANMERKUNG Bei kurzen Spannungsfeldern vermindert die Biegesteifigkeit der Seile den Seilfall; deshalb wird die Fall-Seilzugkraft zu groß berechnet, wenn die Spannungsfeldlänge den etwa 100fachen Durchmesser des Einzelseils unterschreitet, d. h. $l < 100 d_s$.

6.2.6 Horizontale Seilauslenkung b_h und minimaler Leiterabstand a_{min}

Die maximale horizontale Seilauslenkung b_h in Spannungsmitte im Kurzschlussfall wird für Felder mit aufgelegten Seilen $l_c = l$, die an Stützisolatoren und Geräten befestigt sind, berechnet mit

$$b_h = \begin{cases} b_{\text{ct}} & \text{für } \delta_m \geq 90^\circ \\ b_{\text{ct}} \sin \delta_m & \text{für } \delta_m < 90^\circ \end{cases} \quad \text{für } l_c = l \quad (44)$$

Die maximale horizontale Seilauslenkung b_h in Spannungsmitte im Kurzschlussfall wird für Felder mit abgespannten Seilen $l_c = l - 2 l_i$, die mit Isolator Ketten an Gerüsten befestigt sind, berechnet mit

$$b_h = \begin{cases} b_{\text{ct}} \sin \delta_1 & \text{für } \delta_m \geq \delta_1 \\ b_{\text{ct}} \sin \delta_m & \text{für } \delta_m < \delta_1 \end{cases} \quad \text{für } l_c = l - 2 l_i; \quad (45)$$

dabei sind δ_m und δ_1 nach 6.2.1 und b_{ct} nach 6.2.3 zu bestimmen.

Die maximale horizontale Seilauslenkung b_h in Spannungsmitte im Kurzschlussfall für Felder mit abgespannten Seilen $l_c = l - 2 l_i$, die mit Isolator Ketten an Gerüsten befestigt sind und bei denen in Spannungsmitte eine Schlaufe angebracht ist, ist abhängig von der Länge der Schlaufe. Sie ergibt sich für die beiden Fälle

– $\delta_{\text{max}} \geq \delta_m$:

Die Schlaufe hat keinen Einfluss auf die Seilbewegung, und die maximale horizontale Seilauslenkung wird berechnet mit

$$b_h = \begin{cases} b_{ct} \sin \delta_1 & \text{für } \delta_m \geq \delta_1 \\ b_{ct} \sin \delta_m & \text{für } \delta_m < \delta_1 \end{cases} \quad \text{für } l_c = l - 2l_i \quad (46)$$

– $\delta_{\max} < \delta_m$:

Die Schleife beeinflusst die Seilbewegung, und die maximale horizontale Seilauslenkung wird berechnet mit

$$b_h = \begin{cases} b_{ct} \sin \delta_1 & \text{für } \delta_{\max} \geq \delta_1 \\ b_{ct} \sin \delta_{\max} & \text{für } \delta_{\max} < \delta_1 \end{cases} \quad \text{für } l_c = l - 2l_i; \quad (47)$$

dabei sind δ_1 nach 6.2.1, b_{ct} nach 6.2.3 und $\delta_{\max}$ nach 6.2.4 zu bestimmen.

ANMERKUNG Alternativ zu den Gleichungen (46) und (47) darf auch mit Gleichung (45) gerechnet werden.

Durch Kurzschlüsse verursacht bewegen sich die Leiterseile in Spannungsmitte einer Einebenen-Anordnung im ungünstigsten Fall auf einem Kreisbogen mit dem Radius b_h um die Verbindungsgerade der zwei benachbarten Aufhängepunkte. Der Abstand zwischen zwei Hauptleitern in Spannungsmitte ergibt sich bei einem zweipoligen Kurzschluss im ungünstigsten Fall zu

$$a_{\min} = a - 2b_h \quad (48)$$

6.3 Wirkung auf vertikal verlaufende Seile (Schlaufen)

Schlaufen im Sinne dieses Abschnittes sind vorwiegend vertikal verlaufende Seilverbindungen, die üblicherweise zwischen unterschiedlich hohen Geräten oder Isolatoren eingesetzt werden. Voraussetzung für die Anwendung dieses Abschnittes ist, dass der resultierende Federkoeffizient von unterem und oberem Befestigungspunkt den in 6.2.1 empfohlenen Wert von $S = 100 \cdot 10^3 \text{ N/m}$ nicht wesentlich unterschreitet.

Bei Bündelleiteranordnungen ist 6.4 zusätzlich zu beachten.

Im Gegensatz zu der Berechnung der horizontal verlaufenden Leiter nach 6.2 ist die Höhe der maximalen Kraft am unteren Befestigungspunkt und der Seilauslenkung unabhängig von Seilmasse, statischem Seilzug und Kurzschlussdauer. Für das Verhalten während des Kurzschlusses ist allein die Seilgeometrie, bestehend aus Breite und Höhe der Verbindung sowie deren Seillänge l_d , maßgebend.

Die Biegekraft am unteren Befestigungspunkt ist neben der Geometrie außerdem abhängig vom Kurzschlussstrom sowie dem Leiterrittenabstand und berechnet sich für Seillängen $1,4 b_d \leq l_d \leq 3,3 b_d$ zu

$$F_d = \frac{5}{3} l_d \frac{\mu_0}{2\pi} \frac{(I_k'')^2}{a} \frac{l_d}{b_d} \quad (49)$$

mit den Größen nach Bild 8

l_d Seil(bogen)länge

a Abstand zwischen den Hauptleitern (Leiterrittenabstand)

b_d Schlaufenbreite

Die Auslenkung ist nur von der Geometrie abhängig und berechnet sich für Seillängen $l_d \leq 2 K_d$ zu

$$b_{hd} = \left[0,60 \sqrt{\frac{l_d}{K_d}} - 1 + 0,44 \left(\frac{l_d}{K_d} - 1 \right) - 0,32 \ln \frac{l_d}{K_d} \right] \frac{K_d^2}{l_d} \quad (50)$$

mit dem diagonalen Abstand K_d zwischen den zwei Befestigungspunkten in Bild 8.

6.4 Wirkung auf Bündelleiter

6.4.1 Charakteristische Größen und Parameter

Die nachstehende Berechnung gilt für regelmäßige Bündelleiteranordnungen, bei denen die Teilleiter auf einem Kreisbogen angeordnet sind mit gleichen Abständen a_s zu den benachbarten Teilleitern.

Bei regelmäßigen Bündelleiteranordnungen bis einschließlich vier Teilleiter beträgt die Seilzugkraft

$$F_{pi} = 1,1 F_t, \quad (51)$$

wenn durch Teilleiterabstand und Anordnung der Abstandhalter sichergestellt ist, dass die Teilleiter des Bündels während des Kurzschlusses wirksam zusammenschlagen. F_t wird in 6.2 ermittelt.

Das wirksame Zusammenschlagen der Teilleiter gilt als erfüllt, wenn sowohl der Mittenabstand a_s zweier benachbarter Teilleiter als auch der Abstand l_s zweier benachbarter Abstandhalter entweder Gleichung (52) oder Gleichung (53) erfüllen:

$$a_s / d_s \leq 2,0 \quad \text{und} \quad l_s \geq 50 a_s \quad (52)$$

$$a_s / d_s \leq 2,5 \quad \text{und} \quad l_s \geq 70 a_s \quad (53)$$

Falls die regelmäßige Bündelleiteranordnung die zuvor angegebenen Bedingungen nicht erfüllt, ist F_{pi} mit den folgenden Gleichungen zu ermitteln.

Die Kurzschluss-Stromkraft wird berechnet mit

$$F_v = (n-1) \frac{\mu_0}{2\pi} \left(\frac{I_{k3}''}{n} \right)^2 \frac{l_s}{a_s} \frac{\nu_2}{\nu_3} \quad (54)$$

In Einphasen-2-Leiter-Anlagen ist I_{k3}'' in den Gleichung (54), (55), (60) und (63) durch I_{k2}'' zu ersetzen.

Falls der Anfangs-Kurzschlusswechselstrom I_{k1}'' beim einpoligen Fehler größer ist als der Anfangs-Kurzschlusswechselstrom I_{k3}'' beim dreipoligen Fehler, so ist I_{k3}'' in den Gleichungen (54), (55), (60) und (63) durch I_{k1}'' zu ersetzen.

Der Faktor ν_2 ist abhängig von

$$\nu_1 = f \frac{1}{\sin \frac{180^\circ}{n}} \sqrt{\frac{(a_s - d_s) m_s'}{\frac{\mu_0}{2\pi} \left(\frac{I_{k3}''}{n} \right)^2 \frac{n-1}{a_s}}} \quad (55)$$

dem Bild 9 zu entnehmen, wobei f die Frequenz des Stromkreises ist. Der Faktor ν_3 ist dem Bild 10 zu entnehmen.

Die Dehnungsfaktoren, die die Kontraktion des Seilbündels beschreiben, sind zu ermitteln mit

$$\varepsilon_{st} = 1,5 \frac{F_{st} l_s^2 N}{(a_s - d_s)^2} \left(\sin \frac{180^\circ}{n} \right)^2 \quad (56)$$

$$\varepsilon_{pi} = 0,375 n \frac{F_v l_s^3 N}{(a_s - d_s)^3} \left(\sin \frac{180^\circ}{n} \right)^3 \quad (57)$$

Der Parameter

$$j = \sqrt{\frac{\epsilon_{pi}}{1 + \epsilon_{st}}} \quad (58)$$

gibt die Lage der Bündelleiter während des Kurzschlussstrom-Flusses an:

- $j \geq 1$ Die Teilleiter berühren sich. Die Seilzugkraft F_{pi} wird nach 6.4.2 ermittelt.
 $j < 1$ Die Teilleiter verringern ihren Abstand, berühren sich aber nicht. Die Seilzugkraft F_{pi} wird nach 6.4.3 ermittelt.

6.4.2 Seilzugkraft F_{pi} bei zusammenschlagenden Bündelleitern

Falls $j \geq 1$ wird die Seilzugkraft F_{pi} ermittelt mit

$$F_{pi} = F_{st} \left(1 + \frac{v_e}{\epsilon_{st}} \xi \right); \quad (59)$$

dabei ist ξ dem Bild 11 zu entnehmen.

v_e wird ermittelt aus

$$v_e = \frac{1}{2} + \left[\frac{9}{8} n (n-1) \frac{\mu_0}{2\pi} \left(\frac{I_{k3}''}{n} \right)^2 N v_2 \left(\frac{l_s}{a_s - d_s} \right)^4 \frac{\left(\sin \frac{180^\circ}{n} \right)^4}{\xi^3} \left\{ 1 - \frac{\arctan \sqrt{v_4}}{\sqrt{v_4}} \right\} - \frac{1}{4} \right]^{1/2} \quad (60)$$

mit

$$v_4 = \frac{a_s - d_s}{d_s} \quad (61)$$

6.4.3 Seilzugkraft F_{pi} bei nicht zusammenschlagenden Bündelleitern

Falls $j < 1$ gilt, wird die Seilzugkraft F_{pi} ermittelt mit

$$F_{pi} = F_{st} \left(1 + \frac{v_e}{\epsilon_{st}} \eta^2 \right); \quad (62)$$

dabei ist η einem der Diagramme im Bild 12 abhängig vom Verhältnis a_s / d_s zu entnehmen.

v_e wird ermittelt aus

$$v_e = \frac{1}{2} + \left[\frac{9}{8} n (n-1) \frac{\mu_0}{2\pi} \left(\frac{I_{k3}''}{n} \right)^2 N v_2 \left(\frac{l_s}{a_s - d_s} \right)^4 \frac{\left(\sin \frac{180^\circ}{n} \right)^4}{\eta^4} \left\{ 1 - \frac{\arctan \sqrt{v_4}}{\sqrt{v_4}} \right\} - \frac{1}{4} \right]^{1/2} \quad (63)$$

mit

$$v_4 = \eta \frac{a_s - d_s}{a_s - \eta (a_s - d_s)} \quad (64)$$

6.5 Belastung der Stützpunkte durch Leiterseile

6.5.1 Bemessungslasten für Stützisolatoren, deren Unterkonstruktionen und Leiter-Befestigungsmittel

Bei Anordnungen mit Leiterseilen darf der höchste der Werte F_t , F_f , F_{pi} nicht größer sein als der Bemessungswert der Festigkeit, der von den Herstellern der Unterkonstruktionen und Isolatoren angegeben wird. Bei durch Biegekräfte beanspruchten Isolatoren wird der Bemessungswert der Festigkeit als eine am Isolatorkopf angreifende Kraft angegeben.

ANMERKUNG Für eine an einem Punkt oberhalb des Isolatorkopfs angreifende Kraft ist der zulässige Bemessungswert entsprechend dem maximalen Biegemoment des Isolators zu reduzieren.

Die Befestigungsmittel von Leiterseilen sind für den höchsten der Werte $1,5 F_t$, $1,0 F_f$, $1,0 F_{pi}$ zu bemessen.

ANMERKUNG Der Faktor 1,5 berücksichtigt, dass die Energie der Schwingungen von der Masse der Isolatoren aufgenommen wird.

6.5.2 Bemessungslasten für Baukonstruktionen, Isolatoren und Leiter-Befestigungsmittel bei durch Isolator Ketten übertragenen Seilzugkräften

Für die Bemessung der Abspanngerüste, Unterkonstruktionen und Verbindungsmittel ist als maximale dynamische Belastung, die an den Abspannpunkten angreift, eine statische Belastung gleich dem höchsten der Werte F_t , F_f , F_{pi} anzusetzen.

ANMERKUNG 1 Bei der Bemessung von Drehstrom-Anordnungen für dreipolige Kurzschlüsse sollte berücksichtigt werden, dass der höchste der Werte F_t oder F_f in zwei Leitern auftritt und im dritten Leiter nur die statische Seilzugkraft.

ANMERKUNG 2 Bei der Bemessung von Drehstrom-Anordnungen für dreipolige Kurzschlüsse können verschiedene Maxima von F_{pi} zu verschiedenen Zeitpunkten in den drei Hauptleitern auftreten. Dies wird näherungsweise dadurch berücksichtigt, dass der berechnete Wert von F_{pi} in zwei Hauptleitern wirkt.

6.5.3 Bemessungslasten für Fundamente

Für die Bemessung der Fundamente gilt 6.5.1 bzw. 6.5.2 entsprechend.

ANMERKUNG Instabilitätseffekte (Kippen) brauchen aufgrund der Massenträgheit und dem dynamischen Charakter des Kurzschlusses bei der Bemessung von monolithischen Fundamenten (Blockfundamenten) nicht berücksichtigt werden. Es darf davon ausgegangen werden, dass eine ausreichende Standfestigkeit vorliegt, wenn eine Bemessung gemäß anderer Lastfälle und Lasten, wie z. B. statischer Seilzug oder Windlast stattgefunden hat.

7. Thermische Wirkung auf blanke Leiter

7.1 Allgemeines

Die Erwärmung von Leitern durch Kurzschlussströme beinhaltet verschiedene Erscheinungen nichtlinearer Charakteristik und andere Einflüsse, die entweder vernachlässigt oder angenähert werden, um einen mathematischen Lösungsweg zu ermöglichen.

Daher gelten für diesen Abschnitt folgende Voraussetzungen:

- der Skin-Effekt (magnetischer Einfluss eines Leiters auf sich selbst) und der Proximity-Effekt (magnetischer Einfluss von nahen parallelen Leitern) sind vernachlässigt;
- das Widerstands-Temperatur-Verhalten wird als linear vorausgesetzt;
- die spezifische Wärme des Leiters wird als konstant angenommen;
- die Erwärmung wird als adiabat angenommen.

7.2 Berechnung des Temperaturanstiegs

Die Wärmeabgabe eines Leiters während des Kurzschlusses ist sehr gering, und die Erwärmung kann als adiabat betrachtet werden. Der Berechnung in diesem Abschnitt liegen adiabate Voraussetzungen zugrunde.

Wenn aufeinanderfolgende Kurzschlüsse mit einer kurzen Pause dazwischen auftreten, d. h. bei schneller Automatischer Wiedereinschaltung, ist die Abkühlung in der Zeit ohne Strom von vergleichsweise geringem Einfluss, und die Erwärmung kann trotzdem als adiabat angesehen werden. In Fällen, in denen die Pausenzeit länger dauert, d. h. bei verzögerter Automatischer Wiedereinschaltung, sollte die Wärmeabgabe berücksichtigt werden.

Die Berechnung berücksichtigt nicht den Skin- oder Proximity-Effekt, d. h. der Strom wird als über dem Querschnitt gleich verteilt angenommen. Bei Querschnitten über 600 mm² ist der Skin-Effekt zu berücksichtigen. Zur Berechnung wird auf das Schrifttum verwiesen.

ANMERKUNG Bei Zusammensetzung des Hauptleiters aus Teilleitern wird die ungleiche Stromaufteilung zwischen den Teilleitern den Temperaturanstieg in den Teilleitern beeinflussen.

7.3 Berechnung des thermisch gleichwertigen Kurzschlussstroms

Der thermisch gleichwertige Kurzschlussstrom ist nach IEC 60909-0 aus dem Effektivwert des Kurzschlusswechselstroms und Faktoren für die zeitabhängige Wärmewirkung von Gleich- und Wechselstromkomponente des Kurzschlussstroms zu berechnen. Wenn durch Wiedereinschaltungen mehrere aufeinanderfolgende Kurzschlüsse auftreten, muss ein resultierender thermisch gleichwertiger Kurzschlussstrom bestimmt werden.

Für die Berechnung des thermisch gleichwertigen Kurzschlussstroms I_{th} ist in Drehstromanlagen üblicherweise der dreipolige Kurzschluss maßgebend. Bei Einphasenanlagen ist der thermisch gleichwertige Kurzschlussstrom ebenso nach IEC 60909-0 zu ermitteln.

Bei strombegrenzenden Schaltgeräten wird der thermisch gleichwertige Kurzschlussstrom I_{th} und die dazugehörige Dauer T_k des Kurzschlussstroms vom Hersteller angegeben.

7.4 Berechnung des Temperaturanstiegs und der Bemessungs-Kurzschlussstromdichte für Leiter

Der Temperaturanstieg in einem Leiter hervorgerufen durch den Kurzschluss ist eine Funktion der Dauer des Kurzschlussstroms, des thermisch gleichwertigen Kurzschlussstroms und des Leitermaterials.

Bild 13 ermöglicht es, den Temperaturanstieg eines Leiters zu ermitteln, wenn die Bemessungs-Kurzschlussstromdichte bekannt ist, oder umgekehrt.

Die höchsten empfohlenen Kurzschlussstemperaturen sind für verschiedene Leiterarten in Tabelle 6 angegeben. Werden sie erreicht, kann eine unbedeutende Verringerung der mechanischen Festigkeit eintreten, die jedoch die Betriebssicherheit erfahrungsgemäß nicht beeinträchtigt. Die maximal zulässige Temperatur der Leiterbefestigungen ist zu beachten.

7.5 Ermittlung der thermischen Kurzschlussfestigkeit für verschiedene Stromflusszeiten

Blanke Stromleiter haben eine ausreichende thermische Kurzschlussfestigkeit, solange die folgende Bedingung für die thermisch gleichwertige Kurzschlussstromdichte S_{th} bei allen Werten von T_k erfüllt ist:

$$S_{th} \leq S_{thr} \sqrt{\frac{T_{kr}}{T_k}} \quad (65)$$

Die Bemessungs-Kurzschlussstromdichte S_{thr} ist in Bild 13 für $T_{kr} = 1$ s angegeben.

E DIN IEC 60865-1 (VDE 0103):2009-03

Der Stahlanteil von Al/St-Seilen bleibt bei der Festlegung des für die Bestimmung der Stromdichte maßgeblichen Querschnitts unberücksichtigt.

Treten mehrere Kurzschlüsse mit kurzen Pausen dazwischen auf, so erhält man die resultierende Kurzschlussdauer mit

$$T_k = \sum_{i=1}^n T_{ki} \quad (66)$$

Tabelle 1 – Wirksamer Teilleiterabstand a_s für Rechteckprofile, Angaben in Meter

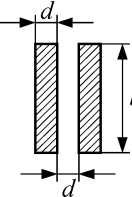
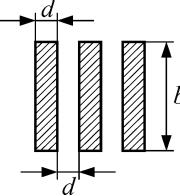
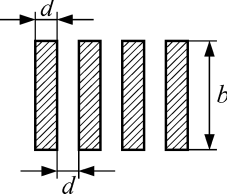
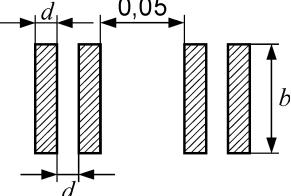
Rechteckprofile	$\begin{matrix} b \\ d \end{matrix}$	0,04	0,05	0,06	0,08	0,10	0,12	0,16	0,20
	0,005	0,020	0,024	0,027	0,033	0,040	—	—	—
	0,010	0,028	0,031	0,034	0,041	0,047	0,054	0,067	0,080
	0,005	—	0,013	0,015	0,018	0,022	—	—	—
	0,010	0,017	0,019	0,020	0,023	0,027	0,030	0,037	0,043
	0,005	—	—	—	—	—	—	—	—
	0,010	0,014	0,015	0,016	0,018	0,020	0,022	0,026	0,031
	0,005	—	0,014	0,015	0,018	0,020	—	—	—
	0,010	0,017	0,018	0,020	0,022	0,025	0,027	0,032	—

Tabelle 2 – Höchstwerte von $V_{\sigma} V_r$, $V_{\sigma s} V_{rs}$, $V_F V_r$

Fehler	Netz			
	ohne dreipolige Automatische Wiedereinschaltung	mit dreipoliger Automatischer Wiedereinschaltung	ohne und mit dreipoliger Automatischer Wiedereinschaltung	
	$V_{\sigma} V_r$, $V_{\sigma s} V_{rs}$	$V_{\sigma} V_r$, $V_{\sigma s} V_{rs}$	$V_F V_r$	
		1. Stromfluss 2. Stromfluss		
zweipolig	1,0	1,0	1,8	Bereich
				<div> $2,0$ für $\frac{\sigma_{tot}}{0,8 R_{p0,2}} \leq 0,5$ </div> <div> $\frac{0,8 R_{p0,2}}{\sigma_{tot}}$ für $0,5 < \frac{\sigma_{tot}}{0,8 R_{p0,2}} < 1,0$ </div> <div> $1,0$ für $1,0 \leq \frac{\sigma_{tot}}{0,8 R_{p0,2}}$ </div> <div> </div>
dreipolig	1,0	1,0	1,8	Bereich
				<div> $2,7$ für $\frac{\sigma_{tot}}{0,8 R_{p0,2}} \leq 0,37$ </div> <div> $\frac{0,8 R_{p0,2}}{\sigma_{tot}}$ für $0,37 < \frac{\sigma_{tot}}{0,8 R_{p0,2}} < 1,0$ </div> <div> $1,0$ für $1,0 \leq \frac{\sigma_{tot}}{0,8 R_{p0,2}}$ </div> <div> </div>