

	Bemessung von Starkstromanlagen auf mechanische und thermische Kurzschlußfestigkeit	DIN VDE 0103
Diese auch vom Vorstand des Verbandes Deutscher Elektrotechniker (VDE) e.V. genehmigte Norm ist damit zugleich eine VDE-Bestimmung im Sinne von VDE 0022. Sie ist unter obenstehender Nummer in das VDE-Vorschriftenwerk aufgenommen und in der etz Elektrotechnische Zeitschrift bekanntgegeben worden.		
Mechanical and thermal short-circuit strength of electrical power installations Ersatz für DIN 57103/ VDE 0103/02.82		
Zusammenhang mit der von der International Electrotechnical Commission (IEC) herausgegebenen Internationalen Norm IEC 865 (1986): siehe Erläuterungen. Die gegenüber den IEC-Festlegungen vorgenommenen Ergänzungen sind durch einen linksseitig gesetzten Strich gekennzeichnet.		
Beginn der Gültigkeit Diese Norm (VDE-Bestimmung) gilt ab 1. April 1988. Entwurf war veröffentlicht als DIN VDE 0103 Teil 100/02.85. Entwurf DIN VDE 0103 A1/06.85 ist eingearbeitet.		
Fortsetzung Seite 2 bis 25		
Deutsche Elektrotechnische Kommission im DIN und VDE (DKE)		

	Inhalt	Seite	Seite
1 Anwendungsbereich		2	
2 Formelzeichen		2	
2.1 Formelzeichen zu Hauptabschnitt eins . . .		3	
2.2 Formelzeichen zu Hauptabschnitt zwei . . .		5	
3 Allgemeine Begriffe		6	
3.1 Hauptleiter		6	
3.2 Teileiter		6	
3.3 Stützpunkt		6	
3.4 Einspannung		6	
3.5 Stützung		6	
3.6 Zwischenstück		6	
3.6.1 Abstandhalter		6	
3.6.2 Versteifungselement		6	
3.7 Befestigungsmittel		6	
3.8 Kurzschlußseilzug		6	
3.9 Fallseilzug		6	
3.10 Bemessungs-Kurzzeitstrom		6	
3.11 Bemessungs-Kurzzeitstromdichte und Bemessungs-Kurzschlußdauer für Leiter		7	
3.12 Thermisch gleichwertiger Kurzschlußstrom		7	
3.13 Thermisch gleichwertige Kurzschlußstromdichte		7	
3.14 Dauer des Kurzschlußstromes		7	
Hauptabschnitt eins – Bemessung auf mechanische Kurzschlußfestigkeit			
4 Allgemeines		7	
4.1 Mechanische Kurzschlußfestigkeit von Starkstromanlagen		7	
4.2 Mechanische Kurzschlußfestigkeit von Betriebsmitteln, Leitern und Befestigungsmitteln		7	
4.3 Kurzschlußstrom		7	
4.4 Beanspruchungsmindernde Einflüsse . . .		7	
4.5 Einschalten auf mehrpoligen Kurzschluß .		7	
4.6 Berücksichtigung der Kurzunterbrechung .		7	
4.7 Kurzschlußdauer T_{k1}		7	
5 Mechanische Kräfte durch Kurzschlußströme		7	
5.1 Allgemeines		7	
5.2 Berechnung der Kräfte bei biege steifen Leitern		8	
5.2.1 Kräfte zwischen zwei parallelen Leitern . .		8	
5.2.2 Berechnung des Spitzenwertes der Kraft zwischen den Hauptleitern bei dreipoligem Kurzschluß		8	
5.2.3 Berechnung des Spitzenwertes der Kraft zwischen den Hauptleitern bei zweipoligem Kurzschluß		8	
5.2.4 Berechnung des Spitzenwertes der Kraft zwischen biege steifen Teileitern		8	
5.2.5 Wirksamer Abstand zwischen Haupt- und Teileitern		8	
6 Berechnung der Spannungen in biege steifen Leitern und der Kräfte auf die Stützpunkte		10	
6.1 Allgemeines		10	
6.2 Berechnung der Spannungen in biege steifen Leitern		10	
6.2.1 Zulässige Leiterspannung		12	
6.2.2 Widerstandsmomente von Hauptleitern, die aus Teileitern zusammengesetzt sind		13	
6.3 Berechnung der Kräfte auf die Stützpunkte biege steifer Leiter		14	
6.4 Berechnung unter besonderer Berücksichtigung der Leiterschwingung		14	
6.4.1 Bestimmung der maßgeblichen Kennfrequenz		14	
6.4.2 Die Faktoren V_{F1} , V_{G1} , V_{G2} und V_F		16	
7 Berechnung der Zugkräfte und der Auslenkung von Leitungsseilen		17	
7.1 Zugkraft F_L während des Kurzschlusses, Kurzschlußseilzug		17	
7.1.1 Einzelseile		17	
7.1.2 Zweierbündel		17	
7.2 Zugkraft F_L nach dem Kurzschluß, Fallseilzug		18	
7.3 Horizontale Seilauslenkung		19	
8 Zulässige Belastung von Stütz-isolatoren und Anschlüssen		19	
Hauptabschnitt zwei – Bemessung auf thermische Kurzschlußfestigkeit			
9 Allgemeines		20	
10 Berechnung des Temperaturanstiegs .		20	
10.1 Allgemeines		20	
10.2 Berechnung des thermisch gleichwertigen Kurzschlußstromes		20	
10.3 Berechnung des Temperaturanstiegs und der Bemessungs-Kurzzeitstromdichte in Leitern		20	
10.4 Berechnung der thermischen Kurzschlußbeanspruchung für verschiedene Stromflußzeiten		21	
10.4.1 Betriebsmittel		21	
10.4.2 Stromleiter		21	
Zitierte Normen und andere Unterlagen		24	

1 Anwendungsbereich

Diese Norm enthält in zwei Hauptabschnitten Verfahren zur Berechnung der Wirkung von Kurzschlußströmen:

- 1 – Elektromagnetische Wirkung auf biege steife Leiter und Leitungsseile.
- 2 – Thermische Wirkung auf Betriebsmittel und Stromleiter.

Diese Norm gilt für das Errichten und Erweitern von Starkstromanlagen mit einer Nennfrequenz bis 500 Hz.

2 Formelzeichen

Die in dieser Norm verwendeten Formelzeichen und Einheiten sind mit ihren Bedeutungen in den Abschnitten 2.1 und 2.2 wiedergegeben.

2.1 Formelzeichen zu Hauptabschnitt eins

Formelzeichen	Einheit ¹⁾	Bedeutung
A	mm ²	Seilquerschnitt (Istwert); bei Bündelleitern Gesamtquerschnitt $n A_s$
A_s	mm ²	Teilleiterquerschnitt (Istwert)
a	cm	Hauptleitermittenabstand, siehe Bild 1
a'_s	cm	(magnetisch) wirksamer Leiterabstand, siehe Tabellen 1 und 2
a_{1s}	cm	Mittenabstand zwischen 1. und s-tem Teilleiter, siehe Bilder 1 und 2
b	cm	Teilleiterabmessung senkrecht zur Krafrichtung, siehe Bild 3
c	1	Faktor für den Zwischenstückeinfluß auf die maßgebliche Kennfrequenz, siehe Bild 4
c_c	1	Faktor für die versteifende Wirkung von Zwischenstücken
c_D	1	Faktor für Durchhangvergrößerung durch Seildehnung
c_F	1	Faktor für Durchhangvergrößerung durch Änderung der Seilkurvenform
c_{th}	mm ⁴ /(kA ² s)	Faktor für thermische Seildehnung
d	cm	Teilleiterabmessung in Krafrichtung, siehe Bild 3
D	cm	Außendurchmesser bei Rohren, siehe Tabelle 5
E	N/mm ²	Elastizitätsmodul
		Stromschienen: Technische Lieferbedingungen für Halbzeuge aus Kupfer für die Elektrotechnik nach den Normen der Reihe DIN 40 500, aus Aluminium für die Elektrotechnik nach den Normen der Reihe DIN 40 501 oder nach Angaben der Hersteller
		Leitungsseile: nach DIN VDE 0210 oder nach Angaben der Hersteller
e_s	cm	Teilleiteraußenabstand bei U-Profilen, siehe Tabelle 2
F	N	Kraft zwischen zwei langen, parallelen Leitern während eines Kurzschlusses
F_d	N	Kraft auf die Stützpunkte bei biegesteifen Leitern während eines Kurzschlusses (Spitzenwert)
F_f	N	Zugkraft in einem Leitungsseil nach einem Kurzschluß
F_{m2}	N	Kraft zwischen den Hauptleitern während eines zweipoligen Kurzschlusses in Dreh-, Wechsel- und Gleichstromanlagen
F_{m3}	N	Kraft auf einen Hauptleiter während eines dreipoligen Kurzschlusses
F_s	N	Kraft zwischen Teilleitern
F_{st}	N	statische Zugkraft in einem Leitungsseil bei -20 °C; bei Bündelleitern statische Gesamtzugkraft $n F_{sts}$
F_{sts}	N	statische Zugkraft in einem Bündelleiter bei -20 °C
F_t	N	Zugkraft in einem Leitungsseil während eines Kurzschlusses bei -20 °C Leiteranfangstemperatur
F_{t60}	N	Zugkraft in einem Leitungsseil während eines Kurzschlusses bei 60 °C Leiteranfangstemperatur
F_{60}	N	statische Zugkraft in einem Leitungsseil bei 60 °C; bei Bündelleitern statische Gesamtzugkraft $n F_{60s}$
F_{60s}	N	statische Zugkraft in einem Bündelleiter bei 60 °C
F'_0	N/cm	Kraftbelag auf das äußere Leitungsseil während eines Kurzschlusses
F'_{ers}	N/cm	Ersatzstromkraftbelag des ausschwingenden Leitungsseils
f	Hz	Betriebsfrequenz des Stromkreises
f'_c	Hz	maßgebliche Kennfrequenz eines Hauptleiters
f'_0	Hz	Grundfrequenz eines Teilleiters ohne Zwischenstücke
g_n	m/s ²	Normalfallbeschleunigung $g_n = 9,80665 \text{ m/s}^2$
h	cm	Abstand des Kraftangriffspunktes von der Stützeroberkante, siehe Bild 1
h_s	cm	Teilleiterhöhe bei U-Profilen, siehe Tabelle 2
I''_{k2}	kA	Anfangs-Kurzschlußwechselstrom bei zweipoligem Kurzschluß (Effektivwert)
I''_{k3}	kA	Anfangs-Kurzschlußwechselstrom bei dreipoligem Kurzschluß (Effektivwert)

¹⁾ 1 steht für das Verhältnis zweier gleicher SI-Einheiten.

Formelzeichen	Einheit ¹⁾	Bedeutung
i_{p2}	kA	Stoßkurzschlußstrom (Spitzenwert) bzw. Durchlaßstrom strombegrenzender Schaltgeräte oder Sicherungen (Spitzenwert) bei zweipoligem Kurzschluß in Dreh-, Wechsel- und Gleichstromanlagen
i_{p3}	kA	Stoßkurzschlußstrom (Spitzenwert) bzw. Durchlaßstrom strombegrenzender Schaltgeräte oder Sicherungen (Spitzenwert) bei dreipoligem (symmetrischem) Kurzschluß
i_1, i_2	kA	Augenblickswerte der Leiterströme
J	cm ⁴	axiales Flächenmoment 2. Grades (Flächenträgheitsmoment) eines Leiters
J_s	cm ⁴	axiales Flächenmoment 2. Grades (Flächenträgheitsmoment) eines Teilleiters
k	1	Anzahl der Zwischenstücke, siehe Bild 4
k_{ts}	1	Faktor für wirksamen Leiterabstand, siehe Bild 2
l	cm	Stützpunktabstand, siehe Bild 1
l_s	cm	größter Abstand eines Zwischenstückes vom Stützpunkt oder vom benachbarten Zwischenstück, siehe Bild 4
m'	kg/cm	Massenbelag eines Leiters; bei Leitungsseilen ohne Eislast; bei Bündelleitern Gesamtmassenbelag $n m'_s$
m'_s	kg/cm	Massenbelag eines Teilleiters
m_z	kg	Gesamtmasse eines Zwischenstückes
n	1	Anzahl der Teilleiter
q	1	Faktor der Plastizität, siehe Tabelle 5
$R_{p0,2}$	N/mm ²	Mindestwert der Streckgrenze (Werte nach den Normen der Reihe DIN 40 500, DIN 40 501 oder nach Angaben des Herstellers)
$R'_{p0,2}$	N/mm ²	Höchstwert der Streckgrenze (Werte nach den Normen der Reihe DIN 40 500, DIN 40 501 oder nach Angaben des Herstellers)
r	1	Verhältnis von Stromkraftbelag zu Gewichtskraftbelag
r_{ers}	1	Ersatzkraftverhältnis bei ausschwingenden Leitungsseilen
S	N/mm	resultierender Federkoeffizient zweier Stützpunkte
s	cm	Wandstärke bei Rohrleitern, siehe Tabelle 5
T	s	Periodendauer des pendelnden Leitungsseiles
T_{ers}	s	Ersatzperiodendauer des pendelnden Leitungsseiles
T_{k1}	s	Kurzschlußdauer; bei Kurzunterbrechung Dauer des ersten Stromflusses
T_u	s	Pausenzeit bei dreipoliger Kurzunterbrechung
V_F	1	Verhältnis von dynamischer zu statischer Kraft auf den Stützpunkt, siehe Tabelle 3, Bilder 5 und 6
V_r	1	Verhältnis von dynamischer Beanspruchung mit erfolgloser dreipoliger Kurzunterbrechung zu dynamischer Beanspruchung ohne dreipolige Kurzunterbrechung, siehe Tabelle 3 und Bild 7
V_σ	1	Verhältnis von dynamischer zu statischer Leiterbeanspruchung, siehe Bilder 5 und 6
$V_{\sigma s}$	1	Verhältnis von dynamischer zu statischer Teilleiterbeanspruchung, siehe Bilder 5 und 6
x	1	bezogener Teilleitermittigenabstand
y	1	bezogene Abstandhalterentfernung
y_k	cm	maximale horizontale Seilauslenkung bei Kurzschluß
y_{60}	cm	statischer Seildurchhang bei 60 °C
Z	cm ³	Hauptleiterwiderstandsmoment
Z_s	cm ³	Teilleiterwiderstandsmoment
α	1	Faktor für die Kraft auf einen Befestigungspunkt, siehe Tabelle 4
α_k	°	Ausschwingwinkel am Kurzschlußende
α_m	°	maximaler Ausschwingwinkel
α_1	°	Richtung der resultierenden Kraft
β	1	Faktor für die Hauptleiterbeanspruchung, siehe Tabelle 4
γ	1	Faktor für die Kennfrequenzbestimmung, siehe Tabelle 4
¹⁾ 1 steht für das Verhältnis zweier gleicher SI-Einheiten.		

Formelzeichen	Einheit ¹⁾	Bedeutung
δ	1	Hilfsgröße für den maximalen Ausschwingwinkel
ε_{ela}	1	elastische Seildehnung
ε_{th}	1	thermische Seildehnung
κ	1	Faktor zur Ermittlung des Stoßkurzschlußstromes nach DIN VDE 0102 Teil 1 (Stoßfaktor)
ξ	1	Faktor für die Zugkraft in Leitungsseilen bei -20 °C
ξ_{60}	1	Faktor für die Zugkraft in Leitungsseilen bei 60 °C
μ_0	Vs/(Am)	magnetische Feldkonstante $\mu_0 = 4 \pi 10^{-7}$ Vs/(Am)
ξ_m	1	Faktor für den Einfluß der Masse von Zwischenstücken auf die maßgebliche Kennfrequenz eines Hauptleiters
φ, ψ	1	Faktoren für die Zugkraft in Leitungsseilen, siehe Bild 8
σ_m	N/mm ²	Biegespannung im Hauptleiter
σ_s	N/mm ²	Biegespannung im Teilleiter
σ_{tot}	N/mm ²	resultierende Biegespannung im Leiter
¹⁾ 1 steht für das Verhältnis zweier gleicher SI-Einheiten.		

2.2 Formelzeichen zu Hauptabschnitt zwei

Formelzeichen	Einheit ¹⁾	Bedeutung
c	J/(g °C)	spezifische Wärmekapazität
I_k	kA	Dauerkurzschlußstrom (Effektivwert)
I_k''	kA	Anfangs-Kurzschlußwechselstrom (Effektivwert)
I_{th}	kA	thermisch gleichwertiger Kurzschlußstrom (Effektivwert)
I_{thi}	kA	einzelner, thermisch gleichwertiger Kurzschlußstrom bei aufeinanderfolgenden Schaltvorgängen (Effektivwert)
I_{thr}	kA	Bemessungs-Kurzzeitstrom (Effektivwert)
m	1	Faktor für die Wärmewirkung der Gleichstromkomponente, siehe Bild 10a
n	1	Faktor für die Wärmewirkung der Wechselstromkomponente, siehe Bild 10b
S_{th}	A/mm ²	thermisch gleichwertige Kurzzeitstromdichte (Effektivwert)
S_{thr}	A/mm ²	Bemessungs-Kurzzeitstromdichte (Effektivwert) für $T_{\text{kr}} = 1\text{ s}$
T_k	s	Kurzschlußdauer
T_{ki}	s	Dauer des i -ten Kurzschlusses bei aufeinanderfolgenden Schaltvorgängen; $i = 1, \dots, l$
T_{kr}	s	Bemessungs-Kurzschlußdauer
α_{20}	1/°C	Temperaturkoeffizient des elektrischen Widerstands bei 20 °C
ϑ_b	°C	Temperatur des Stromleiters bei Kurzschlußbeginn
ϑ_e	°C	Temperatur des mit S_{thr} belasteten Stromleiters (ohne Wärmeabgabe) bei Kurzschlußende
η	1	Faktor für die Wärmeabgabe in die Isolation
κ	1	Faktor zur Ermittlung des Stoßkurzschlußstromes nach DIN VDE 0102 Teil 1 (Stoßfaktor)
κ_{20}	Sm/mm ²	elektrische Leitfähigkeit bei 20 °C
ϱ	g/cm ³	Dichte des Stromleiters
¹⁾ 1 steht für das Verhältnis zweier gleicher SI-Einheiten.		

3 Allgemeine Begriffe

3.1 Hauptleiter

Ein einzelner Leiter oder eine zusammengesetzte Anordnung einer Anzahl von Leitern, die den gesamten Strom eines Stranges führen, siehe Bild 1.

3.2 Teilleiter

Ein Leiter, der einen bestimmten Teil des gesamten Stromes eines Stranges führt und Teil des Hauptleiters ist, siehe Bild 1.

3.3 Stützpunkt

Isolierendes Betriebsmittel zwischen einem Hauptleiter und der geerdeten Konstruktion oder zwischen Hauptleitern.

Anmerkung: Bei Einwirkung elektromagnetischer Kräfte in einer gegebenen Anordnung kann der Stützpunkt Biegung, Zug und/oder Druck infolge der elektromagnetischen Kräfte zwischen den Leitern ausgesetzt sein.

3.4 Einspannung

Ein Stützpunkt, in den Momente in der betrachteten Biegeebe eingeleitet werden können.

3.5 Stützung

Ein Stützpunkt, in den keine Momente in der betrachteten Biegeebe eingeleitet werden können.

3.6 Zwischenstück

Zwischenstück ist jede zusätzliche Masse innerhalb eines Stützabstandes, die nicht zur gleichmäßigen Leitermasse gehört.

Hierzu zählen:

Abstandhalter, Versteifungselemente, Schienenüberlappungen, Abzweigleitungen usw. . . .

Anmerkung: Das in Bild 1 dargestellte Zwischenstück besteht aus zwei Zwischenlagen mit Schrauben und Zubehör.

3.6.1 Abstandhalter

Zwischenstück bei biegesteifen Leitern und bei Seilen, das den Abstand der Teilleiter am Einbauort fixiert.

3.6.2 Versteifungselement

Zwischenstück bei biegesteifen Leitern, das eine Verschiebung der Teilleiter gegeneinander verhindert.

3.7 Befestigungsmittel

Bauteile, mit denen die Leiter unmittelbar oder mittelbar befestigt werden, z.B. Befestigungsklemmen, Stützisolatoren, Unterkonstruktionen.

3.8 Kurzschlußseilzug

Maximalwert des Seilzugs, der während der Kurzschlußdauer erreicht wird.

Anmerkung: In den Leitungseilklemmen und Anschlußbolzen treten Kraftspitzen auf, die den Kurzschlußseilzug übertreffen können, siehe Abschnitt 8.

3.9 Fallseilzug

Maximalwert des Seilzugs, der beim Herabfallen der ausgeschwungenen Seile auftritt.

3.10 Bemessungs-Kurzzeitstrom

Effektivwert des Stromes, dem ein elektrisches Betriebsmittel während der Bemessungs-Kurzschlußdauer unter vorgegebenen Bedingungen standhält.

Anmerkung 1: Es können mehrere Wertepaare von Bemessungs-Kurzzeitstrom und Bemessungs-Kurzschlußdauer angegeben werden, jedoch ist bei der thermischen Wirkung 1 s für die Bemessung zu nehmen.

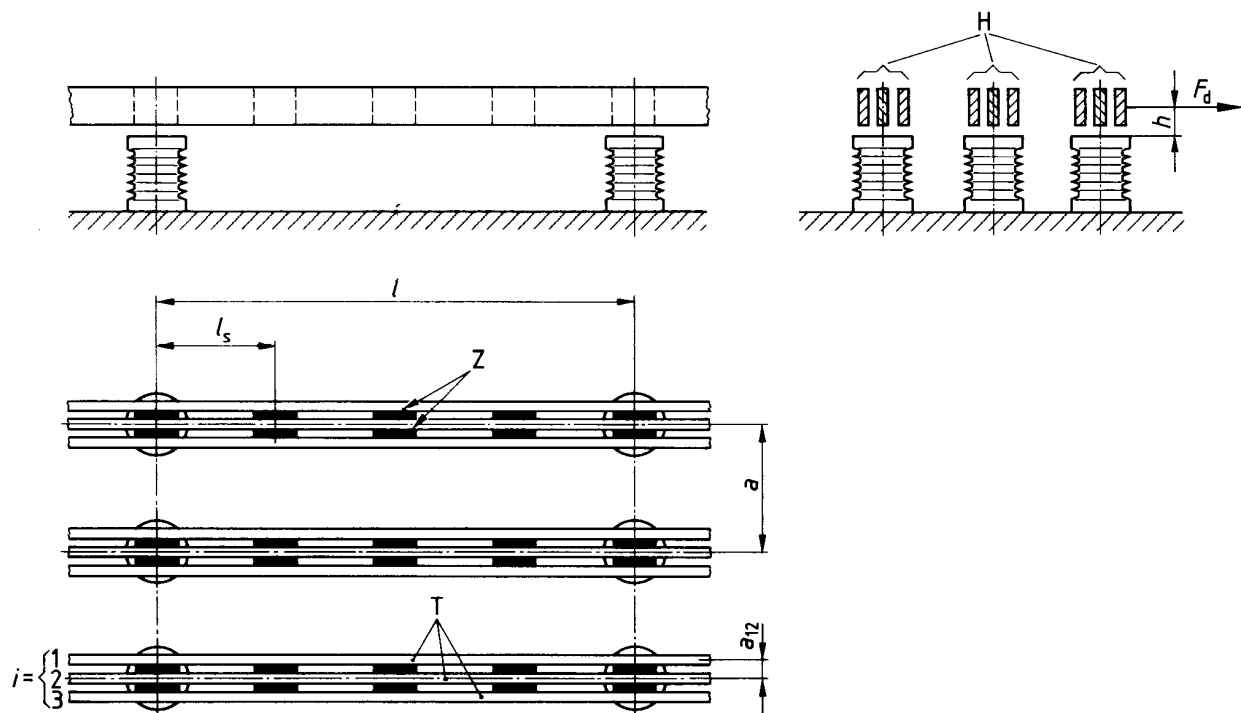


Bild 1. Anordnung mit drei Hauptleitern H zu je drei Teilleitern T mit Zwischenstücken Z

sungs-Kurzschlußdauer in den meisten IEC-Bestimmungen üblich.

Anmerkung 2: Der Bemessungs-Kurzzeitstrom und die zugehörige Bemessungs-Kurzschlußdauer werden vom Betriebsmittelhersteller festgelegt.

3.11 Bemessungs-Kurzzeitstromdichte und Bemessungs-Kurzschlußdauer für Leiter

Effektivwert der Stromdichte, der ein Leiter während der Bemessungs-Kurzschlußdauer standhält.

Anmerkung: Die Bemessungs-Kurzzeitstromdichte wird nach Abschnitt 10 bestimmt.

3.12 Thermisch gleichwertiger Kurzschlußstrom

Konstanter Effektivwert des Stromes mit der gleichen thermischen Wirkung und der gleichen Dauer wie der tatsächliche Kurzschlußstrom, der eine Gleichstromkomponente enthalten und zeitlich abklingen kann.

Anmerkung: Wenn mehrere aufeinanderfolgende Kurzschlüsse auftreten (z.B. Wiedereinschaltungen), wird ein resultierender gleichwertiger Kurzschlußstrom bestimmt (siehe Abschnitt 10.2).

3.13 Thermisch gleichwertige Kurzschlußstromdichte

Der thermisch gleichwertige Kurzschlußstrom dividiert durch den Leiterquerschnitt.

3.14 Dauer des Kurzschlußstromes

Summe der Stromflußzeiten zwischen dem Beginn des Kurzschlusses und der endgültigen Abschaltung der Ströme in allen Strängen.

Hauptabschnitt eins –

Bemessung auf mechanische Kurzschlußfestigkeit

4 Allgemeines

Mit den Rechenverfahren dieses Hauptabschnitts können Kräfte auf Isolatoren, Spannungen in biegesteifen Leitern, Zugkräfte in Leitungsseilen und Seilauslenkungen berechnet werden.

4.1 Mechanische Kurzschlußfestigkeit von Starkstromanlagen

Die mechanische Kurzschlußfestigkeit von Starkstromanlagen wird durch Berechnen oder Prüfen festgestellt.

4.2 Mechanische Kurzschlußfestigkeit von Betriebsmitteln, Leitern und Befestigungsmitteln

Elektrische Betriebsmittel haben eine ausreichende mechanische Kurzschlußfestigkeit, wenn sie mindestens für den am Einbauort größtmöglichen Kurzschlußstrom (Stoßkurzschlußstrom, Durchlaßstrom strombegrenzender Schaltgeräte) unter Berücksichtigung der einbau- und betriebsbedingten Beanspruchungen ausgewählt sind. Die mechanische Kurzschlußfestigkeit von Leitern und Befestigungsmitteln wird festgestellt entweder durch Berechnen für den am Einbauort größtmöglichen Kurzschlußstrom (Stoßkurzschlußstrom, Durchlaßstrom strombegrenzender Schaltgeräte) nach den Abschnitten 6.2, 6.3, 7 und wahlweise nach Abschnitt 6.4 oder durch Prüfen mit diesem Kurzschlußstrom unter Berücksichtigung der Einbau- und Betriebsbedingungen. Die auf praktische Erfordernisse ausgerichteten Rechenverfahren enthalten Vereinfachungen mit Sicherheiten. Zur Be-

messung können auch genauere und ausführlichere Rechenverfahren angewendet werden.

4.3 Kurzschlußstrom

Für die Kurzschlußstromberechnung ist DIN VDE 0102 maßgebend.

4.4 Beanspruchungsmindernde Einflüsse

Bei der Berechnung des größten Kurzschlußstromes dürfen zusätzliche Angaben anderer Normen berücksichtigt werden, z.B. über die der Berechnung zugrunde zu legende Schaltung oder über strombegrenzende Einrichtungen (siehe DIN VDE 0101), falls dies zu einer Verringerung der Beanspruchung führt.

4.5 Einschalten auf mehrpoligen Kurzschluß

Beim Einschalten auf einen mehrpoligen Kurzschluß darf für die Bemessung der Betriebsmittel ein gleichzeitiges Einschalten der Schalterpole vorausgesetzt werden.

4.6 Berücksichtigung der Kurzunterbrechung

Die einpolige Kurzunterbrechung wirkt sich auf die mechanische Festigkeit nicht aus, sie wird nicht berücksichtigt. Die dreipolige Kurzunterbrechung ist nur bei biegesteifen Leitern nach den Abschnitten 6.2, 6.3 und 6.4.2 zu berücksichtigen.

4.7 Kurzschlußdauer T_{k1}

Die im Abschnitt 7 verwendete Kurzschlußdauer T_{k1} wird durch das Sicherheitskonzept vorgegeben und ist vom Betreiber verantwortlich festzulegen.

5 Mechanische Kräfte durch Kurzschlußströme

5.1 Allgemeines

Ströme in parallelen Leitern führen zu elektromagnetischen Kräften zwischen den Leitern. Ist die Länge der parallelen Leiter wesentlich größer als ihr Abstand, so wirken die Kräfte gleichmäßig verteilt auf die Leiter.

Bei entgegengesetzt gerichteten Strömen ist die elektromagnetische Kraft abstoßend; sie versucht eine Verformung hervorzurufen, die die Eigeninduktivität des Kreises vergrößert.

Der Betrag der Kraft in einer vorgegebenen Richtung kann aus der Arbeit bei einer virtuellen Verschiebung in dieser Richtung berechnet werden. Da die Arbeit durch das elektromagnetische Feld verrichtet wird, muß sie gleich der Änderung der Energie des magnetischen Feldes durch diese virtuelle Verschiebung sein. Dies führt auf die Gleichung für die Kraft F_z in z -Richtung:

$$F_z = \frac{1}{2} i^2 \frac{dL}{dz}, \quad (1)$$

worin L die Eigeninduktivität des Kreises und i der Augenblickswert des Stromes sind.

Für einfache und idealisierte Anordnungen sind Formeln zur Berechnung der Induktivitäten verfügbar. In den meisten Fällen sind jedoch Näherungen notwendig, um anwendbare Rechenverfahren zu erhalten.

Die Kraft zwischen zwei Leitern ist dem Quadrat des Stromes oder dem Produkt der beiden Ströme proportional. Ist der Strom eine Funktion der Zeit, so ist die Kraft ebenso eine Funktion der Zeit. Im Falle eines Kurzschlußstromes ohne Gleichstromkomponente ändert sich die Kraft mit der doppelten Frequenz des Stromes. Eine Gleichstromkomponente im Kurzschlußstrom ver-

ursacht einen Anstieg des Spitzenwertes der Kraft und eine Komponente der Kraft mit der Frequenz des Stromes. Der Spitzenwert der Kraft ist bei mechanisch steifen Anordnungen von besonderem Interesse.

Die Kraft führt zur Biegespannung in biegesteifen Leitern, zur Zugspannung und Auslenkung bei Leitungsseilen und zur Biege-, Druck- oder Zugbelastung der Stützpunkte.

5.2 Berechnung der Kräfte bei biegesteifen Leitern

Das Berechnungsverfahren dieses Abschnitts folgt aus der allgemeinen Gleichung (1) unter Vernachlässigung der Abstandsänderung während des Kurzschlusses.

Zusätzliche Kraftwirkungen des Stromes, hervorgerufen durch abgewinkelte oder sich kreuzende Leiter, brauchen nur in Sonderfällen, z.B. bei Leitungen in Hochleistungsprüffeldern, beachtet werden [1].

Bei metallgekapelten Stromleitern kann die durch Abschirmung gegebene Reduzierung der Stromkraft zwischen den Hauptleitern berücksichtigt werden. Zusätzlich ist jedoch die Kraftwirkung zwischen Leiter und Kapse- lung bzw. zwischen den Kapselungen zu beachten [2, 3].

5.2.1 Kräfte zwischen zwei parallelen Leitern

Die zwischen zwei langen, parallelen Leitern wirkenden Kräfte ergeben sich aus der Gleichung

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

$$\text{Zahlenwertgleichung} \quad F = 0,2 i_1 i_2 \frac{l}{a},$$

wobei l der Stützabstand, i_1 und i_2 die Augenblickswerte der Leiterströme und a der Leitermittlenabstand sind.

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

5.2.2 Berechnung des Spitzenwertes der Kraft zwischen den Hauptleitern bei dreipoligem Kurzschluß

In einem Drehstromsystem, bei dem die Leiter in gleichem Abstand in einer Ebene angeordnet sind, beträgt die höchste Kraft während eines dreipoligen Kurzschlusses auf einen Hauptleiter

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

$$\text{Zahlenwertgleichung} \quad F_{m3} = 0,17 i_{p3}^2 \frac{l}{a_s}$$

mit dem Stoßkurzschlußstrom i_{p3} bei dreipoligem Kurzschluß und dem wirksamen Leiterabstand a_s nach Abschnitt 5.2.5.

Anmerkung 1: Der Zahlenwert $\sqrt{3}/2$ in Gleichung (3) berücksichtigt den größtmöglichen Kraftbelag in Drehstromanordnungen. Er tritt z.B. bei einer Einbenenanordnung im mittleren Leiter auf, wenn der Kurzschluß hier 45° el nach dem Nulldurchgang der Sternspannung einsetzt.

Anmerkung 2: Gleichung (3) kann ebenso zur Berechnung des Spitzenwertes der Kraft angewandt werden, wenn die Leiter in den Eckpunkten eines gleichseitigen Dreiecks liegen und a_s die Seitenlänge des Dreiecks ist.

5.2.3 Berechnung des Spitzenwertes der Kraft zwischen den Hauptleitern bei zweipoligem Kurzschluß

Die höchste Kraft zwischen Leitern, die vom Kurzschlußstrom bei zweipoligem Kurzschluß in Dreh-, Wechsel- und Gleichstromanlagen durchflossen werden, beträgt

$$\text{Größengleichung} \quad F_{m2} = \frac{\mu_0}{2\pi} i_{p2}^2 \frac{l}{a_s}, \quad (4)$$

$$\text{Zahlenwertgleichung} \quad F_{m2} = 0,2 i_{p2}^2 \frac{l}{a_s}$$

mit dem Stoßkurzschlußstrom i_{p2} im Falle eines zweipoligen Kurzschlusses ohne Erdberührung und dem wirksamen Leiterabstand a_s nach Abschnitt 5.2.5.

5.2.4 Berechnung des Spitzenwertes der Kraft zwischen biegesteifen Teilleitern

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

$$\text{Größengleichung} \quad F_s = \frac{\mu_0}{2\pi} \left(\frac{i_p}{n}\right)^2 \frac{l_s}{a_s}, \quad (5)$$

$$\text{Zahlenwertgleichung} \quad F_s = 0,2 \left(\frac{i_p}{n}\right)^2 \frac{l_s}{a_s},$$

wenn der Kurzschlußstrom gleichmäßig auf die Teilleiter verteilt ist; n ist die Anzahl der Teilleiter, l_s der Abstand der Zwischenstücke und a_s der wirksame Abstand zwischen den Teilleitern.

Für i_p ist in Drehstromanlagen i_{p3} und in Wechsel- und Gleichstromanlagen i_{p2} einzusetzen.

5.2.5 Wirksamer Abstand zwischen Haupt- und Teilleitern

Die Kräfte zwischen stromdurchflossenen Leitern sind abhängig von der geometrischen Anordnung und dem Profil der Leiter. Deshalb wurde a_s in den Abschnitten 5.2.2, 5.2.3 und 5.2.4 eingeführt. Falls jedoch die Querschnittsabmessungen der Leiter wesentlich kleiner sind als ihr Mittenabstand, kann in den Abschnitten 5.2.2 und 5.2.3 a_s durch den Mittenabstand a der Leiter ersetzt werden.

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

$$\frac{1}{a_s} = \frac{k_{12}}{a_{12}} + \frac{k_{13}}{a_{13}} + \frac{k_{14}}{a_{14}} + \dots + \frac{k_{1n}}{a_{1n}} \quad (6)$$

benutzt werden. Die Werte für $k_{12}, \dots, k_{1n}$ sind dem Bild 2 zu entnehmen.

Für Stromschienenanordnungen mit U-Profilen ist a_s in Tabelle 2 angegeben.