

	DIN IEC/TR 60865-2 (VDE 0103-2)	DIN
	Dies ist zugleich eine VDE-Leitlinie im Sinne von VDE 0022. Sie ist unter der oben angeführten Nummer in das VDE-Vorschriftenwerk aufgenommen und in der „etz Elektrotechnik + Automation“ bekannt gegeben worden.	VDE
ICS 17.220.01 Ersatz für DIN EN 60865-1 Beiblatt 1 (VDE 0103 Beiblatt 1):1996-06 Siehe Anwendungsbeginn Kurzschlussströme – Berechnung der Wirkung – Teil 2: Beispiele für die Berechnung (IEC/TR 60865-2:2015) Short-circuit currents – Calculation of effects – Part 2: Examples of calculation (IEC/TR 60865-2:2015) Courants de court-circuit – Calcul des effets – Partie 2: Exemples de calcul (IEC/TR 60865-2:2015) Das vorliegende Dokument wurde nach den Verfahrensregeln einer VDE-Leitlinie erstellt und ist die Übernahme eines Fachberichts der IEC (IEC/TR). Gesamtumfang 82 Seiten DKE Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik in DIN und VDE		

Anwendungsbeginn

Anwendungsbeginn dieses Dokuments ist 2017-03-01.

Für **DIN EN 60865-1 Beiblatt 1 (VDE 0103 Beiblatt 1):1996-06** besteht eine Übergangsfrist bis 2017-05-31.

Inhalt	Seite
Nationales Vorwort.....	5
Nationaler Anhang NA (informativ) Zusammenhang mit Europäischen und Internationalen Dokumenten	6
Nationaler Anhang NB (informativ) Literaturhinweise.....	6
1 Anwendungsbereich	7
2 Normative Verweisungen	7
3 Formelzeichen und Einheiten	7
4 Beispiel 1 – Mechanische Wirkung auf eine 10-kV-Anordnung mit biegesteifen Einzelleitern	8
4.1 Allgemeines	8
4.2 Daten	9
4.3 Normal-Lastfall: Leiterspannung und Kräfte auf die Stützpunkte durch das Eigengewicht	9
4.4 Ausnahme-Lastfall: Wirkung der Kurzschlussströme.....	10
4.4.1 Spitzenwert der Kraft auf den mittleren Hauptleiter	10
4.4.2 Leiterspannung und Kräfte auf die Stützpunkte	11
4.5 Ergebnisse.....	14
5 Beispiel 2 – Mechanische Wirkung auf eine 10-kV-Anordnung mit biegesteifen Mehrfachleitern.....	14
5.1 Allgemeines	14
5.2 Daten (zusätzlich zu den Daten in Beispiel 1).....	15
5.3 Normal-Lastfall: Leiterspannung und Kräfte auf die Stützpunkte durch das Eigengewicht	15
5.4 Ausnahme-Lastfall: Wirkung der Kurzschlussströme.....	15
5.4.1 Spitzenwerte der Kräfte auf die Leiter	15
5.4.2 Leiterspannungen und Kräfte auf die Stützpunkte	16
5.5 Ergebnisse.....	20
6 Beispiel 3 – Mechanische Wirkung auf eine Hochspannungs-Anordnung mit biegesteifen Leitern.....	20
6.1 Allgemeines	20
6.2 Daten	21
6.3 Normal-Lastfall: Leiterspannung und Kräfte auf die Stützpunkte durch das Eigengewicht	22
6.4 Ausnahme-Lastfall: Wirkung der Kurzschlussströme.....	23
6.4.1 Spitzenwert der Kraft auf den mittleren Hauptleiter	23
6.4.2 Leiterspannung und Kräfte auf die Stützpunkte	23
6.4.3 Ergebnisse.....	30
7 Beispiel 4 – Mechanische Wirkung auf eine 110-kV-Anordnung mit aufgelegten Leiterseilen.....	30
7.1 Allgemeines	30

7.2	Daten.....	31
7.3	Elektromagnetische Kraft und charakteristische Parameter.....	32
7.4	Seilzugkraft $F_{t,d}$ während des Kurzschlusses durch das Ausschlagen.....	34
7.5	Dynamischer Seildurchhang in Spannfeldmitte.....	35
7.6	Seilzugkraft $F_{f,d}$ nach dem Kurzschluss durch das Fallen.....	35
7.7	Horizontale Seilauslenkung b_h und minimaler Leiterabstand a_{min}	36
7.8	Ergebnisse.....	36
8	Beispiel 5 – Mechanische Wirkung auf abgespannte Leiterseile.....	37
8.1	Allgemeines.....	37
8.2	Gemeinsame Daten.....	37
8.3	Teilleiter-Mittenabstand $a_s = 0,1$ m.....	38
8.3.1	Elektromagnetische Kraft und charakteristische Parameter.....	38
8.3.2	Seilzugkraft $F_{t,d}$ während des Kurzschlusses durch das Ausschlagen.....	41
8.3.3	Dynamischer Seildurchhang in Spannfeldmitte.....	41
8.3.4	Seilzugkraft $F_{f,d}$ nach dem Kurzschluss durch das Fallen.....	42
8.3.5	Horizontale Seilauslenkung b_h und minimaler Leiterabstand a_{min}	42
8.3.6	Bündel-Seilzugkraft $F_{pi,d}$	43
8.3.7	Ergebnisse.....	43
8.4	Teilleiter-Mittenabstand $a_s = 0,4$ m.....	43
8.4.1	Vorbemerkungen.....	43
8.4.2	Charakteristische Größen und Parameter.....	44
8.4.3	Bündel-Seilzugkraft $F_{pi,d}$	45
8.4.4	Ergebnisse.....	47
9	Beispiel 6 – Mechanische Wirkung auf abgespannte Leiterseile mit einer Schlaufe in Spannfeldmitte.....	47
9.1	Allgemeines.....	47
9.2	Gemeinsame Daten.....	48
9.3	Ebene der Schleifen parallel zu den Hauptleitern.....	48
9.3.1	Allgemeines.....	48
9.3.2	Stromfluss über die gesamte Länge des Hauptleiter-Spannfeldes.....	49
9.3.3	Stromfluss über die halbe Länge des Hauptleiter-Spannfeldes und über die Schlaufe.....	56
9.4	Ebene der Schleifen senkrecht zu den Hauptleitern.....	63
9.4.1	Allgemeines.....	63
9.4.2	Stromfluss über die gesamte Länge des Hauptleiter-Spannfeldes.....	64
9.4.3	Stromfluss über die halbe Länge des Hauptleiter-Spannfeldes und über die Schlaufe.....	69
10	Beispiel 7 – Mechanische Wirkung auf vertikal verlaufende Seile (Schleifen).....	76
10.1	Allgemeines.....	76
10.2	Daten.....	76

10.3	Kurzschluss-Seilzugkraft und maximale horizontale Seilauslenkung	77
10.4	Bündel-Seilzugkraft	78
10.4.1	Statische Seilzugkraft im Bündel.....	78
10.4.2	Charakteristische Größen und Parameter	78
10.4.3	Bündel-Seilzugkraft $F_{pi,d}$	79
10.5	Ergebnisse.....	80
11	Beispiel 8 – Thermische Wirkung auf blanke Leiter	80
11.1	Allgemeines	80
11.2	Daten	81
11.3	Berechnungen	81
11.4	Ergebnis	81
	Literaturhinweise.....	82

Bilder

Bild 1 – Leiteranordnung.....	8
Bild 2 – Lage der Abstandhalter und der Teilleiter	14
Bild 3 – Zweifeldrige Anordnung mit Rohrleitern	21
Bild 4 – Anordnung mit aufgelegten Leiterseilen	31
Bild 5 – Anordnung mit abgespannten Leiterseilen	37
Bild 6 – Anordnung mit abgespannten Leiterseilen und Schlaufe in Spannungsmitte. Ebene der Schlaufen parallel zu den Hauptleitern.....	47
Bild 7 – Mögliche Anordnungen von Schlaufen mit der Ebene senkrecht zu den Hauptleitern in Dreiphasensystemen und Zweileitersystemen.....	63
Bild 8 – Anordnung mit abgespannten Seilen	76

Nationales Vorwort

Vorausgegangener Entwurf: E DIN IEC/TS 60865-2 (VDE V 0103-2):2013-08.

Für dieses Dokument ist das nationale Arbeitsgremium UK 121.2 „Mechanische und thermische Kurzschlussfestigkeit“ der DKE Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik in DIN und VDE (www.dke.de) zuständig.

Die VDE-Leitlinien enthalten sicherheitstechnische Festlegungen mit einem im Vergleich zu den VDE-Bestimmungen wesentlich erweiterten Ermessensraum für eigenverantwortliches sicherheitstechnisches Handeln.

VDE-Leitlinien sind angebracht, wenn die Vielfalt der zu betrachtenden Sachlagen oder Gestaltungsmöglichkeiten nach vorherrschender Meinung durch unmittelbar anwendbare Anweisungen nicht erfasst werden kann. Sie dienen dem Anwender als Beispielsammlung oder Grundlage für eigene sicherheitstechnische Entscheidungen. Für sich allein sind sie nicht als ausreichende Entscheidungsgrundlage für die Genehmigungs- und Überwachungsbehörden oder die Anwender geeignet.

Die enthaltene IEC-Publikation wurde vom SC 73 „Short-circuit currents“ erarbeitet.

Das IEC-Komitee hat entschieden, dass der Inhalt dieser Publikation bis zu dem Datum (stability date) unverändert bleiben soll, das auf der IEC-Website unter „<http://webstore.iec.ch>“ zu dieser Publikation angegeben ist. Zu diesem Zeitpunkt wird entsprechend der Entscheidung des Komitees die Publikation

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

Es wird auf die Möglichkeit hingewiesen, dass einige Elemente dieses Dokuments Patentrechte berühren können. ISO [und/oder] IEC sind nicht dafür verantwortlich, einige oder alle diesbezüglichen Patentrechte zu identifizieren.

Änderungen

Gegenüber **DIN EN 60865-1 Beiblatt 1 (VDE 0103 Beiblatt 1):1996-06** wurden folgende Änderungen vorgenommen:

- a) die Bestimmungen für Automatische Wiedereinschaltung bei biegesteifen Leitern wurden überarbeitet;
- b) die Anordnungen bei Seilverbindungen wurden geändert;
- c) der Einfluss von Schlaufen in Spannfeldmitte wurde aufgenommen;
- d) für vertikale Seilverbindungen können nun die Auslenkung und die Seilzugkraft auf den unteren Befestigungspunkt berechnet werden;
- e) zusätzliche Festlegungen für Fundament-Lasten aufgrund der Seilzugkräfte wurden aufgenommen;
- f) der Unterabschnitt für die Bestimmung des thermisch gleichwertigen Kurzschlussstroms wurde gelöscht (er ist nun Teil von **IEC 60909-0:2001**);
- g) die Norm **IEC 60865-1:2011** wurde umstrukturiert, und einige Formelzeichen wurden geändert, damit sie mit der Begrifflichkeit Internationaler Normen übereinstimmen;
- h) die Deutsche Fassung wurde im **Abschnitt 2** an die aktuellen Standardtexte angepasst.

Frühere Ausgaben

DIN EN 60865-1 Beiblatt 1 (VDE 0103 Beiblatt 1): 1996-06.

Nationaler Anhang NA (informativ)

Zusammenhang mit Europäischen und Internationalen Dokumenten

Für den Fall einer undatierten Verweisung im normativen Text (Verweisung auf ein Dokument ohne Angabe des Ausgabedatums und ohne Hinweis auf eine Abschnitsnummer, eine Tabelle, ein Bild usw.) bezieht sich die Verweisung auf die jeweils aktuellste Ausgabe des in Bezug genommenen Dokuments.

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

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

Tabelle NA.1

Europäisches Dokument	Internationales Dokument	Deutsches Dokument	Klassifikation im VDE-Vorschriftenwerk
EN 1990	–	DIN EN 1990	–
EN 60865 (alle Teile)	IEC 60865 (alle Teile)	DIN EN 60865 (VDE 0103) (alle Teile)	VDE 0103
EN 60865-1:2012	IEC 60865-1:2011	DIN EN 60865-1 (VDE 0103):2012-09	VDE 0103
–	–	DIN EN 60865-1 Bbl 1 (VDE 0103 Bbl 1):1996-06	VDE 0103 Bbl 1
EN 60909-0:2001	IEC 60909-0:2001	DIN EN 60909-0 (VDE 0102):2002-07	VDE 0102
EN 61936-1	IEC 61936-1	DIN EN 61936-1 (VDE 0101-1)	VDE 0101-1

Nationaler Anhang NB (informativ)

Literaturhinweise

DIN EN 1990, *Eurocode: Grundlagen der Tragwerksplanung*

DIN EN 60865 (VDE 0103) (alle Teile), *Kurzschlussströme – Berechnung der Wirkung*

DIN EN 60865-1 (VDE 0103):2012-09, *Kurzschlussströme – Berechnung der Wirkung – Teil 1: Begriffe und Berechnungsverfahren (IEC 60865-1:2011); Deutsche Fassung EN 60865-1:2012*

DIN EN 60865-1 Beiblatt 1 (VDE 0103 Beiblatt 1):1996-06, *Kurzschluss-Ströme – Berechnung der Wirkung – Teil 1: Begriffe und Berechnungsverfahren – Beispiele für die Berechnung*

DIN EN 60909-0 (VDE 0102):2002-07, *Kurzschlussströme in Drehstromnetzen – Teil 0: Berechnung der Ströme (IEC 60909-0:2001); Deutsche Fassung EN 60909-0:2001*

DIN EN 61936-1 (VDE 0101-1), *Starkstromanlagen mit Nennwechselspannungen über 1 kV – Teil 1: Allgemeine Bestimmungen*

Kurzschlussströme – Berechnung der Wirkung – Teil 2: Beispiele für die Berechnung

1 Anwendungsbereich

Dieser Teil der IEC 60865, der ein Technischer Bericht ist, hat den Zweck, die Anwendung der in **IEC 60865-1** angegebenen Verfahren zur Berechnung der mechanischen und thermischen Wirkungen der Kurzschlussströme zu zeigen. Daher ist dieser Technische Bericht eine Ergänzung zu **IEC 60865-1**. Er verändert jedoch nicht die Grundlage für die Verfahren, die in der Norm angegeben sind.

Die folgenden Punkte sollten besonders beachtet werden:

- a) Die Beispiele in diesem Technischen Bericht zeigen, wie die Berechnungen nach **IEC 60865-1** einfach und leicht nachvollziehbar durchzuführen sind. Sie sind nicht zur Überprüfung von Rechenprogrammen geeignet.
- b) Die Zahlen in Klammern am Ende der Gleichungen verweisen auf die Gleichungen in **IEC 60865-1:2011**.
- c) Die Netzspannungen sind Nennspannungen.
- d) Die Ergebnisse sind auf drei signifikante Stellen gerundet.
- e) Kurzschlusswirkungen treten als außergewöhnliche Last zusätzlich zu den Normallasten in einer Schaltanlage auf. In den folgenden Beispielen mit biegesteifen Leitern wird zusätzlich eine statische Vorbelastung berechnet. Abhängig von der Art der Belastung, ob Normalbetrieb oder Kurzschluss, werden verschiedene Sicherheitsbeiwerte verwendet. Für die Höhe dieser Sicherheitsbeiwerte werden gebräuchliche Werte gewählt, diese Werte werden für die Anwendung empfohlen. Jedoch können auch andere Sicherheitsbeiwerte notwendig sein abhängig vom Sicherheitskonzept.

2 Normative Verweisungen

Die folgenden Dokumente, die in diesem Dokument teilweise oder als Ganzes zitiert werden, sind für die Anwendung dieses Dokuments erforderlich. Bei datierten Verweisungen gilt nur die in Bezug genommene Ausgabe. Bei undatierten Verweisungen gilt die letzte Ausgabe des in Bezug genommenen Dokuments (einschließlich aller Änderungen).

IEC 60865-1:2011, *Short-circuit currents – Calculation of effects – Part 1: Definition and calculation methods*

IEC 60909-0:2001, *Short-circuit current calculation in three-phase AC systems – Part 0: Calculation of currents*

3 Formelzeichen und Einheiten

Für Formelzeichen und Einheiten wird auf **IEC 60865-1:2011** verwiesen.

Zusätzlich werden folgende Formelzeichen verwendet:

$F_{str,k}$	Eigengewichtskraft auf einen Leiter (Kennwert)	N
$F_{str,d}$	Eigengewichtskraft auf einen Leiter (Bemessungswert)	N
$F_{st,r,d}$	Kraft auf den Stützpunkt bei biegesteifen Leitern (Bemessungswert) durch die Eigengewichtskraft	N
h_S, h_I	Höhe der Unterkonstruktion, Höhe des Stützisolators	m
H_S	horizontale Kraftkomponente eines Teilleiters am unteren Befestigungspunkt einer Schlaufe	N

$J_{st,m}$	axiales Flächenmoment 2. Grades (Flächenträgheitsmoment) des Hauptleiters bezüglich der Richtung der Eigengewichtskraft	m^4
I_k	Dauerkurzschlussstrom (Effektivwert) nach IEC 60909-0	A
l_{eff}	wirksame Länge eines Feldes	m
l_f	Formfaktor eines Feldes	m
l_h	Ausdehnung einer Kopfarmatur mit Klemme	m
m, n	Faktor für den Wärmeeffekt des Gleichstromanteils, des Wechselstromanteils des Kurzschlussstroms	1
$M_{S,d}, M_{l,d}$	Biegemoment am Fuß der Unterkonstruktion, am Fuß des Isolators (Bemessungswert)	Nm
V_s	vertikale Kraftkomponente am oberen Befestigungspunkt eines Teilleiters einer Schlaufe	N
$W_{st,m}$	Widerstandsmoment des Hauptleiters bezüglich der Richtung der Eigengewichtskraft	m^3
γ_F	Teilsicherheitsbeiwert für die Einwirkung	1
γ_M	Teilsicherheitsbeiwert für die Bauteileigenschaft	1
$\sigma_{st,m,d}$	Biegespannung durch die Eigengewichtskraft (Bemessungswert)	N/m^2
$\sigma_{st,m,k}$	Biegespannung durch die Eigengewichtskraft (Kennwert)	N/m^2

4 Beispiel 1 – Mechanische Wirkung auf eine 10-kV-Anordnung mit biegesteifen Einzelleitern

4.1 Allgemeines

Grundlage für die Berechnung in diesem Beispiel ist eine dreiphasige 10-kV-Sammelschiene mit einem Leiter je Hauptleiter. Die Leiter sind durchlaufende Balken mit Abstützungen in gleichem Abstand. Die Leiteranordnung zeigt Bild 1. Nach IEC 61936-1 [1]¹⁾ wird die Berechnung durchgeführt für den Normal-Lastfall unter Berücksichtigung des Eigengewichts der Sammelschiene und für den Ausnahme-Lastfall unter Berücksichtigung der Lastkombination aus der Wirkung der Kurzschlussströme und des Eigengewichts.

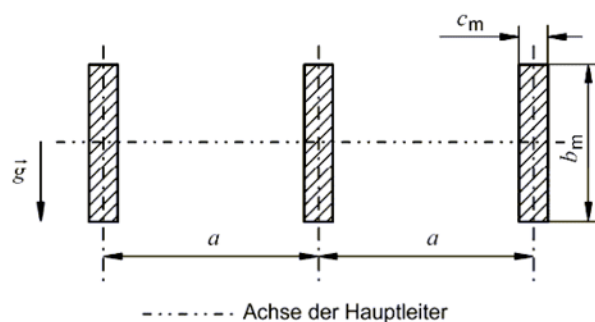


Bild 1 – Leiteranordnung

¹⁾ Die Zahlenangaben in rechteckigen Klammern verweisen auf die Literaturhinweise.

4.2 Daten

Anfangs-Kurzschlusswechselstrom beim dreipoligen Kurzschluss
(Effektivwert)

$$I_k'' = 16 \text{ kA}$$

Faktor zur Berechnung des Stoßkurzschlussstroms

$$\kappa = 1,35$$

Frequenz des Netzes

$$f = 50 \text{ Hz}$$

keine dreipolige Automatische Wiedereinschaltung

Anzahl der Felder

$$\geq 3$$

Mittenabstand der Stützpunkte

$$l = 1 \text{ m}$$

Leitermittenabstand

$$a = 0,2 \text{ m}$$

Leiter aus EN AW-6101B T7 mit Rechteckprofil

– Abmessungen

$$b_m = 60 \text{ mm}$$

$$c_m = 10 \text{ mm}$$

– Massenbelag eines Hauptleiters

$$m'_m = 1,62 \text{ kg/m}$$

– Elastizitätsmodul

$$E = 70\,000 \text{ N/mm}^2$$

– Streckgrenze

$$f_y = 120 \text{ N/mm}^2 \text{ bis } 180 \text{ N/mm}^2$$

Normfallbeschleunigung

$$g = 9,81 \text{ m/s}^2$$

Teilsicherheitsbeiwerte; zum Beispiel nach EN 1990 [2]

– Normal-Lastfall

$$\gamma_F = 1,35$$

$$\gamma_M = 1,1$$

– Ausnahme-Lastfall

$$\gamma_F \gamma_M = 1,0$$

ANMERKUNG Sicherheitsbeiwerte unterscheiden sich in Nationalen Normen.

4.3 Normal-Lastfall: Leiterspannung und Kräfte auf die Stützpunkte durch das Eigengewicht

Die Eigengewichtskraft beträgt:

$$F_{\text{str,k}} = m'_m l g = 1,62 \frac{\text{kg}}{\text{m}} \cdot 1,00 \text{ m} \cdot 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} = 15,9 \text{ N}$$

$$F_{\text{str,d}} = \gamma_F F_{\text{str,k}} = 1,35 \cdot 15,9 \text{ N} = 21,5 \text{ N}$$

Die Biegespannung im Leiter beträgt:

$$\sigma_{st,m,k} = \frac{F_{str,k} l}{8 W_{st,m}} = \frac{15,9 \text{ N} \cdot 1,00 \text{ m}}{8 \cdot 6 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3} = 0,33 \cdot 10^6 \text{ N/m}^2 = 0,33 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{st,m,d} = \gamma_F \sigma_{st,m,k} = 1,35 \cdot 0,33 \text{ N/mm}^2 = 0,45 \text{ N/mm}^2$$

mit

$$J_{st,m} = \frac{c_m b_m^3}{12} = \frac{0,010 \cdot 0,060^3}{12} \text{ m}^4 = 1,8 \cdot 10^{-7} \text{ m}^4$$

$$W_{st,m} = \frac{J_{st,m}}{b_m/2} = \frac{1,8 \cdot 10^{-7} \text{ m}^4}{0,03 \text{ m}} = 6 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3$$

ANMERKUNG Die Gleichung zur Berechnung von $\sigma_{st,m,k}$ gibt den Höchstwert bei zwei Feldern an. Der tatsächliche Wert bei drei oder mehr Feldern ist geringfügig kleiner.

Die Leiter haben eine ausreichende Festigkeit, wenn

$$\sigma_{st,m,d} \leq \frac{f_y}{\gamma_M}$$

mit dem Mindestwert von f_y . Die Teilsicherheitsbeiwerte im Normal-Lastfall γ_F , γ_M siehe 4.2. Dies ergibt:

$$\sigma_{st,m,d} = 0,45 \text{ N/mm}^2 \quad \text{kleiner als} \quad \frac{f_y}{\gamma_M} = \frac{120 \text{ N/mm}^2}{1,1} = 109 \text{ N/mm}^2$$

Die Kräfte auf die Stützpunkte wirken in Richtung der Eigengewichtskraft:

- auf die äußeren Stützpunkte (A) mit $\alpha_A = 0,4$, siehe IEC 60865-1:2011, Tabelle 3:

$$F_{st,r,dA} = \alpha_A F_{str,d} = 0,4 \cdot 21,5 \text{ N} = 8,6 \text{ N}$$

- auf die inneren Stützpunkte (B) mit $\alpha_B = 1,1$, siehe IEC 60865-1:2011, Tabelle 3:

$$F_{st,r,dB} = \alpha_B F_{str,d} = 1,1 \cdot 21,5 \text{ N} = 23,7 \text{ N}$$

ANMERKUNG In einigen Normen können die Sicherheitsbeiwerte für die Stützpunkte den Teilsicherheitsbeiwert γ_F für die Einwirkung enthalten.

4.4 Ausnahme-Lastfall: Wirkung der Kurzschlussströme

4.4.1 Spitzenwert der Kraft auf den mittleren Hauptleiter

Die höchste Kraft auf den mittleren Hauptleiter beträgt:

$$F_{m3} = \frac{\mu_0}{2\pi} \frac{\sqrt{3}}{2} i_p^2 \frac{l}{a_m} = \frac{4\pi \cdot 10^{-7}}{2\pi} \frac{V_s}{A_m} \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot (30,6 \cdot 10^3 \text{ A})^2 \cdot \frac{1,00 \text{ m}}{0,202 \text{ m}} = 803 \text{ N} \quad (2)$$

mit

$$i_p = \kappa \sqrt{2} I_k^* = 1,35 \cdot \sqrt{2} \cdot 16 \text{ kA} = 30,6 \text{ kA} = 30,6 \cdot 10^3 \text{ A}$$

und dem wirksamen Abstand zwischen den Hauptleitern

$$a_m = \frac{a}{k_{12}} = \frac{0,20 \text{ m}}{0,99} = 0,202 \text{ m} \quad (6)$$

mit k_{12} nach IEC 60865-1:2011, Bild 1, mit $a_{1s} = a$, $b_s = b_m$, $c_s = c_m$, für $b_m/c_m = 60 \text{ mm}/10 \text{ mm} = 6$ und $a/c_m = 200 \text{ mm}/10 \text{ mm} = 20$.

4.4.2 Leiterspannung und Kräfte auf die Stützpunkte

4.4.2.1 Allgemeines

Die Berechnungen können nach 4.4.2.2 oder 4.4.2.3 ausgeführt werden.

4.4.2.2 Vereinfachtes Verfahren

4.4.2.2.1 Biegespannung im Leiter

Die maximale Biegespannung beträgt:

$$\sigma_{m,d} = V_{\sigma m} V_{rm} \beta \frac{F_{m3} l}{8 W_m} = 1,0 \cdot 0,73 \cdot \frac{803 \text{ N} \cdot 1,00 \text{ m}}{8 \cdot 1 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3} = 73,3 \cdot 10^6 \text{ N/m}^2 = 73,3 \text{ N/mm}^2 \quad (9)$$

Dabei ist

$$V_{\sigma m} V_{rm} = 1,0 = (V_{\sigma m} V_{rm})_{\max} \quad \text{nach IEC 60865-1:2011, Tabelle 2;}$$

$$\beta = 0,73 \quad \text{nach IEC 60865-1:2011, Tabelle 3;}$$

$$J_m = \frac{c_m^3 b_m}{12} = \frac{0,010^3 \cdot 0,060}{12} \text{ m}^4 = 0,5 \cdot 10^{-8} \text{ m}^4 \text{ (N1);}$$

$$W_m = \frac{J_m}{c_m/2} = \frac{0,5 \cdot 10^{-8} \text{ m}^4}{0,005 \text{ m}} = 1 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3.$$

Die Leiter gelten als kurzschlussfest, wenn

$$\sigma_{m,d} + \sigma_{st,m,k} \leq q f_y \quad (11)$$

mit dem Mindestwert von f_y . $\sigma_{st,m,k}$ siehe 4.3. Bei Rechteckprofilen ist $q = 1,5$, siehe IEC 60865-1:2011, Tabelle 4. Dies ergibt:

$$\sigma_{m,d} + \sigma_{st,m,k} = 73,3 \text{ N/mm}^2 + 0,33 \text{ N/mm}^2 = 73,6 \text{ N/mm}^2 \quad \text{kleiner als} \quad q f_y = 1,5 \cdot 120 \text{ N/mm}^2 = 180 \text{ N/mm}^2$$

4.4.2.2.2 Kräfte auf die Stützpunkte

Die statische Ersatzlast auf die Stützpunkte beträgt:

$$F_{r,d} = V_F V_{rm} \alpha F_{m3} \quad (15)$$

^{N1)} Nationale Fußnote: Die Gleichung für J_m ist im englischen Original nicht vorhanden, jedoch für die weitere Rechnung erforderlich. Auf diese Gleichung wird in 4.4.2.3.1 verwiesen.

Nach IEC 60865-1:2011, Tabelle 2, mit dem Höchstwert von f_y und $\sigma_{\text{tot,d}} = \sigma_{\text{m,d}} + \sigma_{\text{st,m,k}}$ wird:

$$\frac{\sigma_{\text{tot,d}}}{0,8 f_y} = \frac{73,6 \text{ N/mm}^2}{0,8 \cdot 180 \text{ N/mm}^2} = 0,511$$

Daher liegen wir beim dreipoligen Kurzschluss im Bereich 2 von IEC 60865-1:2011, Tabelle 2,

$$0,370 < \frac{\sigma_{\text{tot,d}}}{0,8 f_y} < 1$$

Daraus folgt:

$$V_F V_{\text{rm}} = \frac{0,8 f_y}{\sigma_{\text{tot,d}}} = \frac{1}{0,511} = 1,96$$

Für die äußeren Stützpunkte (A) ergibt sich mit $\alpha_A = 0,4$, siehe IEC 60865-1:2011, Tabelle 3:

$$F_{\text{r,dA}} = V_F V_{\text{rm}} \alpha_A F_{\text{m3}} = 1,96 \cdot 0,4 \cdot 803 \text{ N} = 630 \text{ N}$$

Für die inneren Stützpunkte (B) ergibt sich mit $\alpha_B = 1,1$, siehe IEC 60865-1:2011, Tabelle 3:

$$F_{\text{r,dB}} = V_F V_{\text{rm}} \alpha_B F_{\text{m3}} = 1,96 \cdot 1,1 \cdot 803 \text{ N} = 1731 \text{ N}$$

4.4.2.3 Ausführliches Verfahren

4.4.2.3.1 Maßgebliche Eigenfrequenz f_{cm} und Faktoren V_F , V_{rm} und V_{om}

Die maßgebliche Eigenfrequenz des Hauptleiters beträgt:

$$f_{\text{cm}} = \frac{\gamma}{l^2} \sqrt{\frac{E J_{\text{m}}}{m'_{\text{m}}}} = \frac{3,56}{(1,00 \text{ m})^2} \sqrt{\frac{7 \cdot 10^{10} \text{ N/m}^2 \cdot 0,5 \cdot 10^{-8} \text{ m}^4}{1,62 \text{ kg/m}}} = 52,3 \text{ Hz} \quad (16)$$

Dabei ist

$$\gamma = 3,56 \quad \text{nach IEC 60865-1:2011, Tabelle 3;}$$

$$J_{\text{m}} = 0,5 \cdot 10^{-8} \text{ m}^4 \quad \text{siehe 4.4.2.2.1.}$$

Das Frequenzverhältnis beträgt:

$$\frac{f_{\text{cm}}}{f} = \frac{52,3 \text{ Hz}}{50 \text{ Hz}} = 1,05$$

Aus IEC 60865-1:2011, Bild 4 und 5.7.3, werden die folgenden Werte für die Faktoren V_F , V_{om} und V_{rm} erhalten:

$$\begin{aligned} V_F &= 1,8 \\ V_{\text{om}} &= 1,0 \\ V_{\text{rm}} &= 1,0 \end{aligned}$$

4.4.2.3.2 Biegespannung im Leiter

Die maximale Biegespannung beträgt:

$$\sigma_{m,d} = V_{\sigma m} V_{rm} \beta \frac{F_{m3} l}{8 W_m} = 1,0 \cdot 1,0 \cdot 0,73 \cdot \frac{803 \text{ N} \cdot 1,00 \text{ m}}{8 \cdot 1 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3} = 73,3 \cdot 10^6 \text{ N/m}^2 = 73,3 \text{ N/mm}^2 \quad (9)$$

Dabei ist

$$V_{\sigma m} V_{rm} = 1,0 \cdot 1,0 \quad \text{nach 4.4.2.3.1;}$$

$$\beta = 0,73 \quad \text{nach IEC 60865-1:2011, Tabelle 3;}$$

$$W_m = 1 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3 \quad \text{siehe 4.4.2.2.1.}$$

Die Leiter gelten als kurzschlussfest, wenn

$$\sigma_{m,d} + \sigma_{st,m,k} \leq q f_y \quad (11)$$

mit dem Mindestwert von f_y . $\sigma_{st,m,k}$ siehe 4.3. Bei Rechteckprofilen ist $q = 1,5$, siehe IEC 60865-1:2011, Tabelle 4. Dies ergibt:

$$\sigma_{m,d} + \sigma_{st,m,k} = 73,3 \text{ N/mm}^2 + 0,33 \text{ N/mm}^2 = 73,6 \text{ N/mm}^2 \quad \text{kleiner als} \quad q f_y = 1,5 \cdot 120 \text{ N/mm}^2 = 180 \text{ N/mm}^2$$

4.4.2.3.3 Kräfte auf die Stützpunkte

Die statische Ersatzlast auf die Stützpunkte beträgt:

$$F_{r,d} = V_F V_{rm} \alpha F_{m3} \quad (15)$$

Nach IEC 60865-1:2011, Tabelle 2, mit dem Höchstwert von f_y und $\sigma_{tot,d} = \sigma_{m,d} + \sigma_{st,m,k}$ beträgt sie:

$$\frac{\sigma_{tot,d}}{0,8 f_y} = \frac{73,6 \text{ N/mm}^2}{0,8 \cdot 180 \text{ N/mm}^2} = 0,511$$

Daher liegen wir beim dreipoligen Kurzschluss im Bereich 2 von IEC 60865-1:2011, Tabelle 2,

$$0,370 < \frac{\sigma_{tot,d}}{0,8 f_y} < 1$$

Daraus folgt

$$V_F V_{rm} = \frac{0,8 f_y}{\sigma_{tot,d}} = \frac{1}{0,511} = 1,96$$

Nach 4.4.2.3.1 gilt $V_F V_{rm} = 1,8 \cdot 1,0 = 1,8$, was kleiner ist als der Wert 1,96 nach IEC 60865-1:2011, Tabelle 2.

Für die äußeren Stützpunkte (A) ergibt sich mit $\alpha_A = 0,4$, siehe IEC 60865-1:2011, Tabelle 3:

$$F_{r,dA} = V_F V_{rm} \alpha_A F_{m3} = 1,8 \cdot 1,0 \cdot 0,4 \cdot 803 \text{ N} = 578 \text{ N}$$

Für die inneren Stützpunkte (B) ergibt sich mit $\alpha_B = 1,1$, siehe IEC 60865-1:2011, Tabelle 3:

$$F_{r,dB} = V_F V_{rm} \alpha_B F_{m3} = 1,8 \cdot 1,0 \cdot 1,1 \cdot 803 \text{ N} = 1 590 \text{ N}$$

4.5 Ergebnisse

Die Sammelschienenleiter haben ausreichende Festigkeit bei Belastung durch das Eigengewicht.

Die berechnete Biegespannung beträgt $\sigma_{st,m,d}$ 1 N/mm²

Die äußeren Stützpunkte müssen einer vertikalen Kraft widerstehen von $F_{st,r,dA}$ 9 N

Die inneren Stützpunkte müssen einer vertikalen Kraft widerstehen von $F_{st,r,dB}$ 24 N

		Vereinfachtes Verfahren	Ausführliches Verfahren
Die Sammelschienenleiter sind kurzschlussfest.			
Die berechnete Biegespannung beträgt	$\sigma_{tot,d}$	74 N/mm ²	74 N/mm ²
Die äußeren Stützpunkte müssen einer statischen Ersatzlast widerstehen von	$F_{r,dA}$	630 N	580 N
Die inneren Stützpunkte müssen einer statischen Ersatzlast widerstehen von	$F_{r,dB}$	1 740 N	1 590 N

Die Ergebnisse für die Spannungen und Kräfte sind gerundet.

Die mit dem ausführlichen Verfahren berechneten Kräfte sind niedriger als die mit dem vereinfachten Verfahren berechneten Kräfte.

5 Beispiel 2 – Mechanische Wirkung auf eine 10-kV-Anordnung mit biegesteifen Mehrfachleitern

5.1 Allgemeines

Grundlage für die Berechnung in diesem Beispiel ist die gleiche dreiphasige 10-kV-Sammelschiene wie in Beispiel 1, jedoch mit drei Teilleitern je Hauptleiter, wie in Bild 2 dargestellt. Die Querschnitte der Teilleiter betragen 60 mm × 10 mm, wie die Einzelleiter in Beispiel 1. Nach IEC 61936-1 [1] wird die Berechnung durchgeführt für den Normal-Lastfall unter Berücksichtigung des Eigengewichts der Sammelschiene und für den Ausnahme-Lastfall unter Berücksichtigung der Lastkombination aus der Wirkung der Kurzschlussströme und des Eigengewichts.

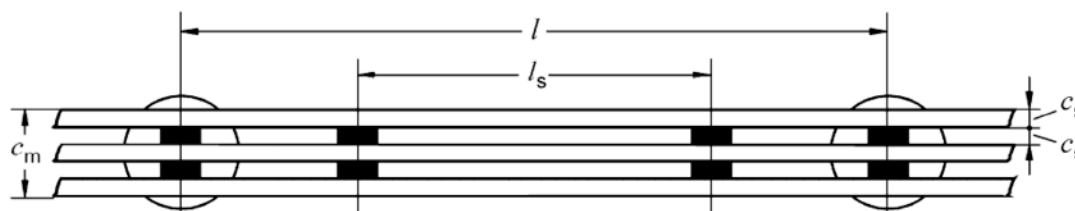


Bild 2 – Lage der Abstandhalter und der Teilleiter

5.2 Daten (zusätzlich zu den Daten in Beispiel 1)

Anzahl der Teilleiter eines Hauptleiters	$n = 3$
Teilleiter-Abmessung in Krafrichtung	$c_s = 10 \text{ mm}$
Anzahl der Abstandhalter-Garnituren	$k = 2$
Mittenabstand der Abstandhalter	$l_s = 0,5 \text{ m}$
Abmessung der Abstandhalter aus EN AW-6101B T7	$60 \text{ mm} \times 60 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$

5.3 Normal-Lastfall: Leiterspannung und Kräfte auf die Stützpunkte durch das Eigengewicht

In 4.3 (Beispiel 1) sind die folgenden Werte für einen Einzelleiter berechnet:

Eigengewichtskraft des Leiters	$F_{\text{str},k} = 15,9 \text{ N}$
	$F_{\text{str},d} = 21,5 \text{ N}$
Biegespannung im Leiter	$\sigma_{\text{st},m,k} = 0,33 \text{ N/mm}^2$
	$\sigma_{\text{st},m,d} = 0,45 \text{ N/mm}^2$

In diesem Beispiel 2 ist die Biegespannung im Leiter die gleiche wie im Beispiel 1, 4.3. Entsprechend der Anzahl der Teilleiter eines Hauptleiters beträgt die vertikale Kraft auf die Stützpunkte das n -Fache:

- auf die äußeren Stützpunkte (A) wirkt mit $\alpha_A = 0,4$, siehe IEC 60865-1:2011, Tabelle 3:

$$F_{\text{st},r,dA} = n \alpha_A F_{\text{str},d} = 3 \cdot 0,4 \cdot 21,5 \text{ N} = 25,8 \text{ N}$$

- auf die inneren Stützpunkte (B) wirkt mit $\alpha_B = 1,1$, siehe IEC 60865-1:2011, Tabelle 3:

$$F_{\text{st},r,dB} = n \alpha_B F_{\text{str},d} = 3 \cdot 1,1 \cdot 21,5 \text{ N} = 71,0 \text{ N}$$

5.4 Ausnahme-Lastfall: Wirkung der Kurzschlussströme

5.4.1 Spitzenwerte der Kräfte auf die Leiter

5.4.1.1 Spitzenwert der Kraft auf den mittleren Hauptleiter

Die höchste Kraft auf den mittleren Hauptleiter beträgt:

$$F_{m3} = \frac{\mu_0}{2\pi} \frac{\sqrt{3}}{2} i_p^2 \frac{l}{a_m} = \frac{4\pi \cdot 10^{-7}}{2\pi} \frac{V_s}{A_m} \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \left(30,6 \cdot 10^3 \text{ A}\right)^2 \cdot \frac{1,00 \text{ m}}{0,20 \text{ m}} = 811 \text{ N} \quad (2)$$

Dabei ist

$$i_p = \kappa \sqrt{2} I_k'' = 1,35 \cdot \sqrt{2} \cdot 16 \text{ kA} = 30,6 \text{ kA} = 30,6 \cdot 10^3 \text{ A}$$

und der wirksame Abstand zwischen den Hauptleitern

$$a_m = \frac{a}{k_{12}} = \frac{0,2 \text{ m}}{1,00} = 0,20 \text{ m} \quad (6)$$

mit k_{12} nach IEC 60865-1:2011, Bild 1, für $a_{1s} = a$, $b_s = b_m$, $c_s = c_m$, für $b_m/c_m = 60 \text{ mm}/50 \text{ mm} = 1,2$ und $a/c_m = 200 \text{ mm}/50 \text{ mm} = 4$. Die Abmessungen b_m und c_m sind in IEC 60865-1:2011, Bild 2 b), dargestellt.

5.4.1.2 Spitzenwert der Kraft auf den Teilleiter

Die höchste Kraft auf den äußeren Teilleiter zwischen zwei benachbarten Zwischenstücken beträgt:

$$F_s = \frac{\mu_0}{2\pi} \left(\frac{i_p}{n} \right)^2 \frac{l_s}{a_s} = \frac{4\pi \cdot 10^{-7}}{2\pi} \frac{V_s}{\text{Am}} \cdot \left(\frac{30,6 \cdot 10^3 \text{ A}}{3} \right)^2 \cdot \frac{0,5 \text{ m}}{20,2 \cdot 10^{-3} \text{ m}} = 515 \text{ N} \quad (4)$$

Dabei ist

$$\frac{1}{a_s} = \frac{k_{12}}{a_{12}} + \frac{k_{13}}{a_{13}} = \frac{0,60}{20 \text{ mm}} + \frac{0,78}{40 \text{ mm}} = \frac{1}{20,2 \text{ mm}} \quad (8)$$

mit k_{12} und k_{13} nach IEC 60865-1:2011, Bild 1:

- $k_{12} = 0,60$ für $a_{12}/c_s = 20 \text{ mm}/10 \text{ mm} = 2$ und $b_s/c_s = b_m/c_s = 60 \text{ mm}/10 \text{ mm} = 6$;
- $k_{13} = 0,78$ für $a_{13}/c_s = 40 \text{ mm}/10 \text{ mm} = 4$ und $b_s/c_s = b_m/c_s = 60 \text{ mm}/10 \text{ mm} = 6$;

oder a_s nach IEC 60865-1:2011, Tabelle 1.

5.4.2 Leiterspannungen und Kräfte auf die Stützpunkte

5.4.2.1 Allgemeines

Die Berechnungen können nach 5.4.2.2 oder 5.4.2.3 ausgeführt werden.

5.4.2.2 Vereinfachtes Verfahren

5.4.2.2.1 Biegespannung durch die Kräfte zwischen den Hauptleitern

Die höchste Biegespannung durch die Kräfte zwischen den Hauptleitern beträgt:

$$\sigma_{m,d} = V_{\sigma m} V_{rm} \beta \frac{F_{m3} l}{8 W_m} = 1,0 \cdot 0,73 \cdot \frac{811 \text{ N} \cdot 1,00 \text{ m}}{8 \cdot 3 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3} = 24,7 \cdot 10^6 \text{ N/m}^2 = 24,7 \text{ N/mm}^2 \quad (9)$$

Dabei ist

$$V_{\sigma m} V_{rm} = 1,0 = (V_{\sigma m} V_{rm})_{\max} \quad \text{nach IEC 60865-1, Tabelle 2;}$$

$$\beta = 0,73 \quad \text{nach IEC 60865-1, Tabelle 3;}$$

$$J_s = \frac{c_s^3 b_s}{12} = \frac{0,010^3 \cdot 0,060}{12} \text{ m}^4 = 0,5 \cdot 10^{-8} \text{ m}^4;$$

$$W_s = \frac{J_s}{c_s/2} = \frac{0,5 \cdot 10^{-8} \text{ m}^4}{0,005 \text{ m}} = 1 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3;$$

$$W_m = n W_s = 3 \cdot 1 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3 = 3 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3 \quad \text{nach IEC 60865-1, 5.4.2.}$$

5.4.2.2.2 Biegespannung durch die Kräfte zwischen den Teilleitern

Die höchste Biegespannung durch die Kräfte zwischen den Teilleitern beträgt:

$$\sigma_{s,d} = V_{\sigma s} V_{rs} \frac{F_s l_s}{16 W_s} = 1,0 \cdot \frac{515 \text{ N} \cdot 0,5 \text{ m}}{16 \cdot 1 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3} = 16,1 \cdot 10^6 \text{ N/m}^2 = 16,1 \text{ N/mm}^2 \quad (10)$$

Dabei ist

$$V_{os} V_{rs} = 1,0 = (V_{os} V_{rs})_{\max} \quad \text{nach IEC 60865-1:2011, Tabelle 2;}$$

$$W_s = 1 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3 \quad \text{siehe 5.4.2.2.1.}$$

5.4.2.2.3 Gesamte Biegespannung im Leiter

Die gesamte Biegespannung wird mit den in 5.4.2.2.1, 5.4.2.2.2 und 5.3 ermittelten Spannungen berechnet:

$$\sigma_{\text{tot,d}} = \sigma_{\text{m,d}} + \sigma_{\text{s,d}} + \sigma_{\text{st,m,k}} = 24,7 \text{ N/mm}^2 + 16,1 \text{ N/mm}^2 + 0,33 \text{ N/mm}^2 = 41,1 \text{ N/mm}^2 \quad (12)$$

Die Leiter gelten als kurzschlussfest, wenn

$$\sigma_{\text{tot,d}} \leq q f_y \quad (13)$$

mit dem Mindestwert von f_y . Bei Rechteckprofilen ist $q = 1,5$, siehe IEC 60865-1:2011, Tabelle 4 oder 5.4.2. Dies ergibt:

$$\sigma_{\text{tot,d}} = 41,1 \text{ N/mm}^2 \quad \text{kleiner als} \quad q f_y = 1,5 \cdot 120 \text{ N/mm}^2 = 180 \text{ N/mm}^2$$

Für die Biegespannung infolge der Kräfte zwischen den Teilleitern wird empfohlen:

$$\sigma_{\text{s,d}} \leq f_y \quad (14)$$

mit dem Mindestwert von f_y . Dies ergibt:

$$\sigma_{\text{s,d}} = 16,1 \text{ N/mm}^2 \quad \text{kleiner als} \quad f_y = 120 \text{ N/mm}^2$$

5.4.2.2.4 Kräfte auf die Stützpunkte

Die statische Ersatzlast auf die Stützpunkte beträgt:

$$F_{\text{r,d}} = V_F V_{\text{rm}} \alpha F_{\text{m3}} \quad (15)$$

Nach IEC 60865-1:2011, Tabelle 2, mit dem Höchstwert von f_y ergibt sich:

$$\frac{\sigma_{\text{tot,d}}}{0,8 f_y} = \frac{41,1 \text{ N/mm}^2}{0,8 \cdot 180 \text{ N/mm}^2} = 0,285$$

Daher liegen wir beim dreipoligen Kurzschluss im Bereich 1 von IEC 60865-1:2011, Tabelle 2,

$$\frac{\sigma_{\text{tot,d}}}{0,8 f_y} < 0,370$$

Daraus folgt

$$V_F V_{\text{rm}} = 2,7$$

Für die äußeren Stützpunkte (A) ergibt sich mit $\alpha_A = 0,4$, siehe IEC 60865-1:2011, Tabelle 3:

$$F_{\text{r,dA}} = V_F V_{\text{rm}} \alpha_A F_{\text{m3}} = 2,7 \cdot 0,4 \cdot 811 \text{ N} = 876 \text{ N}$$

Für die inneren Stützpunkte (B) ergibt sich mit $\alpha_B = 1,1$, siehe IEC 60865-1:2011, Tabelle 3:

$$F_{r,dB} = V_F V_{rm} \alpha_B F_{m3} = 2,7 \cdot 1,1 \cdot 811 \text{ N} = 2 409 \text{ N}$$

5.4.2.3 Ausführliches Verfahren

5.4.2.3.1 Maßgebliche Eigenfrequenz f_{cm} des Hauptleiters, f_{cs} der Teilleiter und Faktoren V_F , $V_{\sigma m}$, $V_{\sigma s}$, V_{rm} und V_{rs}

Die maßgebliche Eigenfrequenz des Hauptleiters beträgt:

$$f_{cm} = e \frac{\gamma}{l^2} \sqrt{\frac{E J_s}{m'_s}} = 0,97 \cdot \frac{3,56}{(1,00 \text{ m})^2} \sqrt{\frac{7 \cdot 10^{10} \text{ N/m}^2 \cdot 0,5 \cdot 10^{-8} \text{ m}^4}{1,62 \text{ kg/m}}} = 50,8 \text{ Hz} \quad (17)$$

Dabei ist

$e = 0,97$ nach IEC 60865-1:2011, Bild 3 c), für $k = 2 \left(\frac{l_s}{l} = 0,5 \right)$ und dem Verhältnis

$$\frac{m_z}{n m'_s l} = \frac{1,62 \text{ kg/m} \cdot 0,06 \text{ m} \cdot 2}{3 \cdot 1,62 \text{ kg/m} \cdot 1,00 \text{ m}} = 0,04 ;$$

$\gamma = 3,56$ nach IEC 60865-1:2011, Tabelle 3;

$J_s = 0,5 \cdot 10^{-8} \text{ m}^4$ siehe 5.4.2.2.1.

Die maßgebliche Eigenfrequenz des Teilleiters beträgt:

$$f_{cs} = \frac{3,56}{l_s^2} \sqrt{\frac{E J_s}{m'_s}} = \frac{3,56}{(0,5 \text{ m})^2} \sqrt{\frac{7 \cdot 10^{10} \text{ N/m}^2 \cdot 0,5 \cdot 10^{-8} \text{ m}^4}{1,62 \text{ kg/m}}} = 209 \text{ Hz} \quad (18)$$

Die Frequenzverhältnisse betragen:

$$\frac{f_{cm}}{f} = \frac{50,8 \text{ Hz}}{50 \text{ Hz}} = 1,02$$

$$\frac{f_{cs}}{f} = \frac{209 \text{ Hz}}{50 \text{ Hz}} = 4,18$$

Mit IEC 60865-1:2011, Bild 4 und 5.7.3, werden die folgenden Werte für die Faktoren V_F , $V_{\sigma m}$, $V_{\sigma s}$, V_{rm} und V_{rs} erhalten:

$$\begin{array}{ll} V_F = 1,8 & \\ V_{\sigma m} = 1,0 & V_{\sigma s} = 1,0 \\ V_{rm} = 1,0 & V_{rs} = 1,0 \end{array}$$

5.4.2.3.2 Biegespannung durch die Kräfte zwischen den Hauptleitern

Die maximale Biegespannung durch die Kräfte zwischen den Hauptleitern beträgt:

$$\sigma_{m,d} = V_{\sigma m} V_{rm} \beta \frac{F_{m3} l}{8 W_m} = 1,0 \cdot 1,0 \cdot 0,73 \cdot \frac{811 \text{ N} \cdot 1,00 \text{ m}}{8 \cdot 3 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3} = 24,7 \cdot 10^6 \text{ N/m}^2 = 24,7 \text{ N/mm}^2 \quad (9)$$

Dabei ist

$$V_{\text{om}} V_{\text{rm}} = 1,0 \cdot 1,0 \quad \text{nach 5.4.2.3.1;}$$

$$\beta = 0,73 \quad \text{nach IEC 60865-1:2011, Tabelle 3;}$$

$$W_{\text{m}} = 3 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3 \quad \text{siehe 5.4.2.2.1.}$$

5.4.2.3.3 Biegespannung durch die Kräfte zwischen den Teilleitern

Die maximale Biegespannung durch die Kräfte zwischen den Teilleitern beträgt:

$$\sigma_{\text{s,d}} = V_{\text{os}} V_{\text{rs}} \frac{F_{\text{s}} l_{\text{s}}}{16 W_{\text{s}}} = 1,0 \cdot 1,0 \cdot \frac{515 \text{ N} \cdot 0,5 \text{ m}}{16 \cdot 1 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3} = 16,1 \cdot 10^6 \text{ N/m}^2 = 16,1 \text{ N/mm}^2 \quad (10)$$

Dabei ist

$$V_{\text{om}} V_{\text{rm}} = 1,0 \cdot 1,0 \quad \text{nach 5.4.2.3.1;}$$

$$W_{\text{s}} = 1 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3 \quad \text{siehe 5.4.2.2.1.}$$

5.4.2.3.4 Gesamte Biegespannung im Leiter

Die gesamte Biegespannung im Leiter beträgt mit den in 5.4.2.3.2 und 5.4.2.3.3 und 5.3 ermittelten Spannungen:

$$\sigma_{\text{tot,d}} = \sigma_{\text{m,d}} + \sigma_{\text{s,d}} + \sigma_{\text{st,m,k}} = 24,7 \text{ N/mm}^2 + 16,1 \text{ N/mm}^2 + 0,33 \text{ N/mm}^2 = 41,1 \text{ N/mm}^2 \quad (12)$$

Die Leiter gelten als kurzschlussfest, wenn

$$\sigma_{\text{tot,d}} \leq q f_{\text{y}} \quad (13)$$

mit dem Mindestwert von f_{y} . Bei Rechteckprofilen ist $q = 1,5$, siehe IEC 60865-1:2011, Tabelle 4. Dies ergibt:

$$\sigma_{\text{tot,d}} = 41,1 \text{ N/mm}^2 \quad \text{kleiner als} \quad q f_{\text{y}} = 1,5 \cdot 120 \text{ N/mm}^2 = 180 \text{ N/mm}^2$$

Es wird empfohlen

$$\sigma_{\text{s,d}} \leq f_{\text{y}} \quad (14)$$

mit dem Mindestwert von f_{y} . Dies ergibt:

$$\sigma_{\text{s,d}} = 16,1 \text{ N/mm}^2 \quad \text{kleiner als} \quad f_{\text{y}} = 120 \text{ N/mm}^2$$

5.4.2.3.5 Kräfte auf die Stützpunkte

Die statische Ersatzlast auf die Stützpunkte beträgt:

$$F_{\text{r,d}} = V_{\text{F}} V_{\text{rm}} \alpha F_{\text{m3}} \quad (15)$$

Nach IEC 60865-1:2011, Tabelle 2, mit dem Höchstwert von f_{y} wird:

$$\frac{\sigma_{\text{tot,d}}}{0,8 f_{\text{y}}} = \frac{41,1 \text{ N/mm}^2}{0,8 \cdot 180 \text{ N/mm}^2} = 0,285$$

Daher liegen wir beim dreipoligen Kurzschluss im Bereich 1 von IEC 60865-1:2011, Tabelle 2,

$$\frac{\sigma_{\text{tot,d}}}{0,8 f_y} < 0,370$$

Daraus folgt

$$V_F V_{rm} = 2,7$$

Nach 5.4.2.3.1 gilt $V_F V_{rm} = 1,8 \cdot 1,0 = 1,8$, was kleiner ist als der Wert 2,7 nach IEC 60865-1:2011, Tabelle 2.

Für die äußeren Stützpunkte (A) ergibt sich mit $\alpha_A = 0,4$, siehe IEC 60865-1:2011, Tabelle 3:

$$F_{r,dA} = V_F V_{rm} \alpha_A F_{m3} = 1,8 \cdot 1,0 \cdot 0,4 \cdot 811 \text{ N} = 584 \text{ N}$$

Für die inneren Stützpunkte (B) ergibt sich mit $\alpha_B = 1,1$, siehe IEC 60865-1:2011, Tabelle 3:

$$F_{r,dB} = V_F V_{rm} \alpha_B F_{m3} = 1,8 \cdot 1,0 \cdot 1,1 \cdot 811 \text{ N} = 1 606 \text{ N}$$

5.5 Ergebnisse

Die Sammelschienenleiter haben ausreichende Festigkeit bei Belastung durch das Eigengewicht.

Die berechnete Biegespannung beträgt $\sigma_{\text{st,m,d}} = 1 \text{ N/mm}^2$

Die äußeren Stützpunkte müssen einer vertikalen Kraft widerstehen von $F_{\text{st,r,dA}} = 26 \text{ N}$

Die inneren Stützpunkte müssen einer vertikalen Kraft widerstehen von $F_{\text{st,r,dB}} = 71 \text{ N}$

		Vereinfachtes Verfahren	Ausführliches Verfahren
Die Sammelschienenleiter sind kurzschlussfest.			
Die berechneten Biegespannungen betragen	$\sigma_{\text{tot,d}}$	42 N/mm ²	42 N/mm ²
	$\sigma_{\text{s,d}}$	17 N/mm ²	17 N/mm ²
Die äußeren Stützpunkte müssen einer statischen Ersatzlast widerstehen von	$F_{r,dA}$	880 N	590 N
Die inneren Stützpunkte müssen einer statischen Ersatzlast widerstehen von	$F_{r,dB}$	2 410 N	1 610 N
Die mit dem ausführlichen Verfahren berechneten Kräfte sind niedriger als die mit dem vereinfachten Verfahren berechneten Kräfte.			

6 Beispiel 3 – Mechanische Wirkung auf eine Hochspannungs-Anordnung mit biegesteifen Leitern

6.1 Allgemeines

Grundlage für die Berechnung in diesem Beispiel ist eine dreiphasige 380-kV-Sammelschiene mit einem Rohrleiter je Hauptleiter. Bild 3 zeigt die Leiteranordnung. Dieses Beispiel enthält Berechnungen ohne und mit Automatischer Wiedereinschaltung. Ohne Automatische Wiedereinschaltung gibt es nur eine Stromflussdauer, mit Automatischer Wiedereinschaltung gibt es zwei Stromflussdauern mit einem stromlosen Intervall dazwischen.

Nach IEC 61936-1 [1] wird die Berechnung durchgeführt für den Normal-Lastfall unter Berücksichtigung des Eigengewichts der Sammelschiene und für den Ausnahme-Lastfall unter Berücksichtigung der Lastkombination aus der Wirkung der Kurzschlussströme und des Eigengewichts.

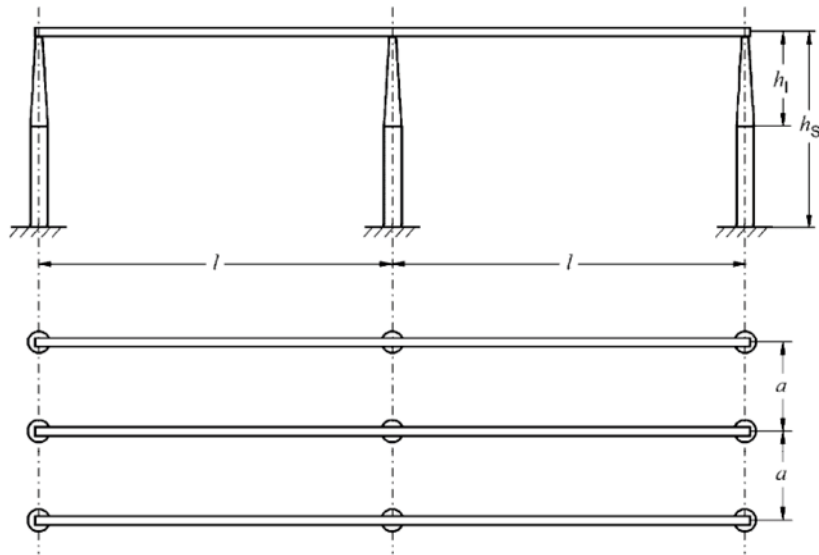


Bild 3 – Zweifeldrige Anordnung mit Rohrleitern

6.2 Daten

Anfangs-Kurzschlusswechselstrom beim dreipoligen Kurzschluss (Effektivwert) $I_k'' = 50 \text{ kA}$

Faktor zur Berechnung des Stoßkurzschlussstroms $K = 1,81$

Frequenz des Netzes $f = 50 \text{ Hz}$

Anzahl der Felder 2

Mittenabstand der Stützpunkte $l = 18 \text{ m}$

Leitermittenabstand $a = 5 \text{ m}$

Höhe des Isolators mit Klemme $h_l = 3,7 \text{ m}$

Höhe der Unterkonstruktion $h_s = 7,0 \text{ m}$

Rohrleiter $160 \text{ mm} \times 6 \text{ mm EN AW-6101B T6}$

– Massenbelag $m'_m = 7,84 \text{ kg/m}$

– Außendurchmesser $d = 160 \text{ mm}$

– Wanddicke $t = 6 \text{ mm}$

– Elastizitätsmodul $E = 70\,000 \text{ N/mm}^2$

– Streckgrenze $f_y = 160 \text{ N/mm}^2 \text{ bis } 240 \text{ N/mm}^2$

Normfallbeschleunigung $g = 9,81 \text{ m/s}^2$

Teilsicherheitsbeiwerte; zum Beispiel nach EN 1990 [2]

- Normal-Lastfall $\gamma_F = 1,35$
- $\gamma_M = 1,1$
- Ausnahme-Lastfall $\gamma_F \gamma_M = 1,0$

ANMERKUNG Sicherheitsbeiwerte unterscheiden sich in Nationalen Normen.

6.3 Normal-Lastfall: Leiterspannung und Kräfte auf die Stützpunkte durch das Eigengewicht

Die Eigengewichtskraft beträgt:

$$F_{\text{str,k}} = m'_m l g = 7,84 \frac{\text{kg}}{\text{m}} \cdot 18 \text{ m} \cdot 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} = 1384 \text{ N}$$

$$F_{\text{str,d}} = \gamma_F F_{\text{str,k}} = 1,35 \cdot 1384 \text{ N} = 1868 \text{ N}$$

Die Biegespannung im Leiter beträgt:

$$\sigma_{\text{st,m,k}} = \frac{F_{\text{str,k}} l}{8 W_m} = \frac{1384 \text{ N} \cdot 18 \text{ m}}{8 \cdot 108 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3} = 28,8 \cdot 10^6 \text{ N/m}^2 = 28,8 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{\text{st,m,d}} = \gamma_F \sigma_{\text{st,m,k}} = 1,35 \cdot 28,8 \text{ N/mm}^2 = 38,9 \text{ N/mm}^2$$

mit

$$J_m = \frac{\pi}{64} (d^4 - (d - 2t)^4) = \frac{\pi}{64} \cdot (0,16^4 - (0,16 - 2 \cdot 0,006)^4) \text{ m}^4 = 8,62 \cdot 10^{-6} \text{ m}^4$$

$$W_m = \frac{J_m}{d/2} = \frac{8,62 \cdot 10^{-6} \text{ m}^4}{0,16/2 \text{ m}} = 108 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3$$

Die Leiter haben eine ausreichende Festigkeit, wenn

$$\sigma_{\text{st,m,d}} \leq \frac{f_y}{\gamma_M}$$

mit dem Mindestwert von f_y . Die Teilsicherheitsbeiwerte im Normal-Lastfall γ_F , γ_M siehe 6.2. Dies ergibt:

$$\sigma_{\text{st,m,d}} = 38,9 \text{ N/mm}^2 \quad \text{kleiner als} \quad \frac{f_y}{\gamma_M} = \frac{160 \text{ N/mm}^2}{1,1} = 145 \text{ N/mm}^2$$

Die Kräfte auf die Stützpunkte wirken in Richtung der Eigengewichtskraft:

- auf die äußeren Stützpunkte (A) mit $\alpha_A = 0,375$, siehe IEC 60865-1:2011, Tabelle 3:

$$F_{\text{st,r,dA}} = \alpha_A F_{\text{str,d}} = 0,375 \cdot 1868 \text{ N} = 701 \text{ N} = 0,701 \text{ kN}$$

- auf die inneren Stützpunkte (B) mit $\alpha_B = 1,25$, siehe IEC 60865-1:2011, Tabelle 3:

$$F_{\text{st,r,dB}} = \alpha_B F_{\text{str,d}} = 1,25 \cdot 1868 \text{ N} = 2335 \text{ N} = 2,335 \text{ kN}$$

6.4 Ausnahme-Lastfall: Wirkung der Kurzschlussströme

6.4.1 Spitzenwert der Kraft auf den mittleren Hauptleiter

Die höchste elektromagnetische Kraft auf den mittleren Hauptleiter beträgt:

$$F_{m3} = \frac{\mu_0}{2\pi} \frac{\sqrt{3}}{2} i_p^2 \frac{l}{a_m} = \frac{4\pi \cdot 10^{-7}}{2\pi} \frac{V_s}{A_m} \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot (128 \cdot 10^3 \text{ A})^2 \cdot \frac{18 \text{ m}}{5 \text{ m}} = 10\,200 \text{ N} = 10,2 \text{ kN} \quad (2)$$

Dabei ist

$$i_p = \kappa \sqrt{2} I_k'' = 1,81 \cdot \sqrt{2} \cdot 50 \text{ kA} = 128 \text{ kA} = 128 \cdot 10^3 \text{ A}$$

und $a_m = a = 5 \text{ m}$ nach IEC 60865-1:2011, 5.3.

6.4.2 Leiterspannung und Kräfte auf die Stützpunkte

6.4.2.1 Allgemeines

Die Berechnungen können nach 6.4.2.2 oder 6.4.2.3 ausgeführt werden.

6.4.2.2 Vereinfachtes Verfahren

6.4.2.2.1 Berechnung ohne dreipolige Automatische Wiedereinschaltung

6.4.2.2.1.1 Biegespannung im Leiter

Die maximale Biegespannung beträgt:

$$\sigma_{m,d} = V_{\sigma m} V_{rm} \beta \frac{F_{m3} l}{8 W_m} = 1,0 \cdot 0,73 \cdot \frac{10,2 \cdot 10^3 \text{ N} \cdot 18 \text{ m}}{8 \cdot 108 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3} = 155 \cdot 10^6 \text{ N/m}^2 = 155 \text{ N/mm}^2 \quad (9)$$

Dabei ist

$$V_{\sigma m} V_{rm} = 1,0 = (V_{\sigma m} V_{rm})_{\max} \quad \text{nach IEC 60865-1:2011, Tabelle 2;}$$

$$\beta = 0,73 \quad \text{nach IEC 60865-1:2011, Tabelle 3;}$$

$$W_m = 108 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3 \quad \text{siehe 6.3.}$$

Bei Rohrprofilen wird die gesamte Biegespannung im Leiter berechnet mit:

$$\sigma_{\text{tot},d} = \sqrt{\sigma_{m,d}^2 + \sigma_{\text{st},m,k}^2} = \sqrt{155^2 + 28,8^2} \text{ N/mm}^2 = 158 \text{ N/mm}^2$$

Die Leiter gelten als kurzschlussfest, wenn

$$\sigma_{\text{tot},d} \leq q f_y \quad (11)$$

mit dem Mindestwert von f_y . Bei Rohrprofilen ist nach IEC 60865-1:2011, Tabelle 4:

$$q = 1,7 \frac{1 - (1 - 2t/d)^3}{1 - (1 - 2t/d)^4} = 1,7 \cdot \frac{1 - (1 - 2 \cdot 0,006 \text{ m} / (0,160 \text{ m}))^3}{1 - (1 - 2 \cdot 0,006 \text{ m} / (0,160 \text{ m}))^4} = 1,32$$

Dies ergibt:

$$\sigma_{\text{tot,d}} = 158 \text{ N/mm}^2 \quad \text{kleiner als} \quad q f_y = 1,32 \cdot 160 \text{ N/mm}^2 = 211 \text{ N/mm}^2$$

6.4.2.2.1.2 Kräfte auf die Stützpunkte und Momente in den Unterkonstruktionen

Die statische Ersatzlast auf die Stützpunkte beträgt:

$$F_{r,d} = V_F V_{rm} \alpha F_{m3} \quad (15)$$

Nach IEC 60865-1:2011, Tabelle 2, mit dem höheren Wert von f_y wird:

$$\frac{\sigma_{\text{tot,d}}}{0,8 f_y} = \frac{158 \text{ N/mm}^2}{0,8 \cdot 240 \text{ N/mm}^2} = 0,823$$

Daher liegen wir im Bereich 2 von IEC 60865-1:2011, Tabelle 2,

$$0,370 < \frac{\sigma_{\text{tot,d}}}{0,8 f_y} < 1$$

Daraus folgt

$$V_F V_{rm} = \frac{0,8 f_y}{\sigma_{\text{tot,d}}} = \frac{1}{0,823} = 1,22$$

Für die äußeren Stützpunkte (A) ergibt sich mit $\alpha_A = 0,375$, siehe IEC 60865-1:2011, Tabelle 3:

$$F_{r,dA} = V_F V_{rm} \alpha_A F_{m3} = 1,22 \cdot 0,375 \cdot 10,2 \text{ kN} = 4,67 \text{ kN}$$

Für die inneren Stützpunkte (B) ergibt sich mit $\alpha_B = 1,25$, siehe IEC 60865-1:2011, Tabelle 3:

$$F_{r,dB} = V_F V_{rm} \alpha_B F_{m3} = 1,22 \cdot 1,25 \cdot 10,2 \text{ kN} = 15,6 \text{ kN}$$

Die Biegemomente in den Unterkonstruktionen betragen:

- am Fuß der äußeren Isolatoren

$$M_{IA,d} = F_{r,dA} h_I = 4,67 \text{ kN} \cdot 3,7 \text{ m} = 17,3 \text{ kNm} ;$$

- am Fuß der äußeren Stützen

$$M_{SA,d} = F_{r,dA} h_S = 4,67 \text{ kN} \cdot 7,0 \text{ m} = 32,7 \text{ kNm} ;$$

- am Fuß der inneren Isolatoren

$$M_{IB,d} = F_{r,dB} h_I = 15,6 \text{ kN} \cdot 3,7 \text{ m} = 57,7 \text{ kNm} ;$$

- am Fuß der inneren Stützen

$$M_{SB,d} = F_{r,dB} h_S = 15,6 \text{ kN} \cdot 7,0 \text{ m} = 109 \text{ kNm} .$$

6.4.2.2.2 Berechnung mit dreipoliger Automatischer Wiedereinschaltung^{N2)}

6.4.2.2.2.1 Allgemeines

In Netzen mit dreipoliger Automatischer Wiedereinschaltung können unterschiedliche mechanische Beanspruchungen während der ersten und der zweiten Stromflussdauer auftreten. In 6.4.2.2.1 werden die Spannungen und Kräfte während der ersten Stromflussdauer ermittelt.

6.4.2.2.2.2 Biegespannung im Leiter

Die maximale Biegespannung beträgt während der zweiten Stromflussdauer:

$$\sigma_{m,d} = V_{\sigma m} V_{rm} \beta \frac{F_{m3} l}{8 W_m} = 1,8 \cdot 0,73 \cdot \frac{10,2 \cdot 10^3 \text{ N} \cdot 18 \text{ m}}{8 \cdot 108 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3} = 279 \cdot 10^6 \text{ N/m}^2 = 279 \text{ N/mm}^2 \quad (9)$$

Dabei ist

$$V_{\sigma m} V_{rm} = 1,8 = (V_{\sigma m} V_{rm})_{\max} \quad \text{nach IEC 60865-1:2011, Tabelle 2;}$$

$$\beta = 0,73 \quad \text{nach IEC 60865-1:2011, Tabelle 3;}$$

$$W_m = 108 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3 \quad \text{siehe 6.3.}$$

Die Biegespannung ist während der zweiten Stromflussdauer größer als die in 6.4.2.2.1.1 berechnete Biegespannung während der ersten Stromflussdauer.

Die gesamte Biegespannung im Leiter beträgt:

$$\sigma_{\text{tot},d} = \sqrt{\sigma_{m,d}^2 + \sigma_{\text{st},m,k}^2} = \sqrt{279^2 + 28,8^2} \text{ N/mm}^2 = 281 \text{ N/mm}^2$$

Die Leiter gelten als kurzschlussfest, wenn

$$\sigma_{\text{tot},d} \leq q f_y \quad (11)$$

mit dem unteren Wert von f_y und mit $q = 1,32$, siehe 6.4.2.2.1.1. Dies ergibt:

$$\sigma_{\text{tot},d} = 281 \text{ N/mm}^2 \quad \text{größer als} \quad q f_y = 1,32 \cdot 160 \text{ N/mm}^2 = 211 \text{ N/mm}^2$$

Wird nur das Ergebnis des vereinfachten Verfahrens berücksichtigt, so sind die Leiter nicht kurzschlussfest. Daher ist es notwendig, das ausführliche Verfahren anzuwenden, um zu zeigen, dass die Leiter kurzschlussfest sind.

6.4.2.2.2.3 Kräfte auf die Stützpunkte

Die folgenden Berechnungen sind nur zur Information, da die Sammelschiene nach dem vereinfachten Verfahren nicht kurzschlussfest ist.

Die statische Ersatzlast auf die Stützpunkte beträgt:

$$F_{r,d} = V_F V_{rm} \alpha F_{m3} \quad (15)$$

^{N2)} Nationale Fußnote: Dreipolige Wiedereinschaltung ist in Deutschland in 380-kV-Netzen nicht üblich. Die Berechnungen in 6.4.2.2.2 und 6.4.2.3.2.3 sollen jedoch die grundsätzliche Vorgehensweise zeigen.