

Kurzschlussbeanspruchung von Bündelleitern in Hochspannungsanlagen

Autor(en): **Zurbriggen, R.**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins : gemeinsames Publikationsorgan des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins (SEV) und des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätswerke (VSE)**

Band (Jahr): **61 (1970)**

Heft 6

PDF erstellt am: **13.09.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-915925>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

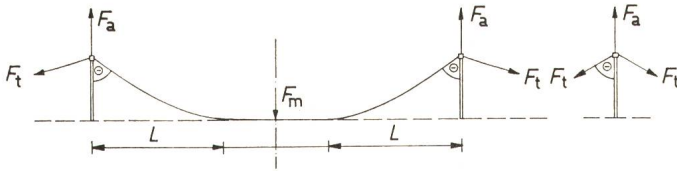


Fig. 3

Zug- und Druckbeanspruchung eines Teilleiters in einem Teilfeld bei Berücksichtigung der magnetischen Anziehungskraft, mit Seilberührung

F_a Reaktionskraft auf die Abstandhalter; F_m elektromagnetische Anziehungskraft; F_t totale Seilzugkraft

Weitere Bezeichnungen siehe Fig. 2

die Rückstellkraft für unsere Betrachtung wegfallen.

In folgender vereinfachter Rechenmethode [1] wird die totale Seilzugkraft an den Abspannstellen einerseits mittels der Gesetze der Elektrotechnik, andererseits mittels der Gesetze der Mechanik bestimmt.

Es sei hier ein waagrechtes Zweierbündel betrachtet, wobei jedoch die gleichen Überlegungen auch für Mehrfachbündel gemacht werden können (Fig. 1 und 2).

2.1 Verwendete Buchstabensymbole

F_t	totale Seilzugkraft (kp)	} pro Teilleiter
F_s	statische Seilzugkraft (kp)	
F_d	dynamische Seilzugkraft (kp)	
F_e	elastische Dehnungskraft (kp)	
F_m	elektromagnetische Anziehungskraft (kp)	
F_a	Reaktionskraft auf die Abstandhalter (kp)	
G	Gewicht der Teilleiter pro Meter (kg)	
A	Querschnitt pro Teilleiter (mm ²)	
E	Elastizitätsmodul der Teilleiter (kp/mm ²)	
I_k	Kurzschlußstrom (3phas. sym. Effektivwert) (kA)	
I_t	Kurzschlußstrom pro Teilleiter (3phas. sym. Effektivwert) (kA)	
c	Phasenabstand (m)	
t	Teilleiterabstand (m)	
b	Spannweite (m)	
n	Anzahl Teilfeldlängen	
s	Teilfeldlänge (m)	
L	Kontaktfreie Länge der Teilleiter pro halbes Teilfeld (m)	
ΔL	Verlängerung der Teilleiter pro halbes Teilfeld (m)	
a	minimaler Abstand zwischen den Teilleitern (m)	
P	Parabelparameter (Abstand: Brennpunkt-Leitlinie) (m)	
θ	Winkel zwischen Abstandhalter und Teilleiter (Grad)	
K	Systemkonstante	
t_i	Zeitdauer für Seilberührung (s)	
t_k	Kurzschlussdauer (s)	
t_{max}	Zeitdauer für Auftreten der maximalen Seilzugkraft (s)	
h	Steighöhe (m)	
f	Seildurchhang (m)	
x	horizontale Auslenkung der Bündelleiter zwischen den Phasen (m)	
y	vertikale Auslenkung der Bündelleiter zwischen den Phasen (m)	

2.2 Erster Berechnungsgang

In einem ersten Berechnungsgang wird zur Bestimmung der maximalen Seilzugkraft nur die magnetische Anziehungskraft, welche zwischen den Teilleitern auftritt, berücksichtigt. Die statische Seilzugkraft sowie die Seildehnung werden vorerst ausser Betracht gelassen.

Zusätzlich werden folgende Annahmen bzw. Vereinfachungen getroffen:

- a) Die Spannweite der Bündelleiter wird durch eine Anzahl Abstandhalter in gleichgrosse Teilfeldlängen aufgeteilt.
- b) Die parabelförmig durchhängenden Bündelleiter werden als Polygonzug aufgefasst, wobei die Ecken durch die Abstandhalter gebildet werden.
- c) Die Teilleiter biegen sich bei Bündelleiteranziehung bei den Abstandhaltern scharf um.
- d) Die Kräfte in den einzelnen Teilfeldlängen halten sich das Gleichgewicht, so dass die totalen Seilzugkräfte, welche an den Abspann- bzw. Verbindungsstellen der Bündelleiter auftreten, gleich

gross sind, wie sie an den Enden der einzelnen Teilfelder angreifen. Es wird daher für die Berechnungen nur ein Teilfeld betrachtet.

e) Die Gleichgewichtsbedingungen für ein Teilfeld werden für die xy -Ebene aufgestellt. Die Kräfte in der z -Ebene werden nicht berücksichtigt (Seilgewicht, Verkleinerung des Durchhangs).

f) Der Verlauf der Teilleiter innerhalb eines Teilfeldes wird annäherungsweise bei Bündelleiteranziehung durch folgende Parabelgleichung dargestellt:

$$t(x) = \frac{x^2}{2p} + a$$

g) In den Berechnungen wird nicht der Stosskurzschlußstrom zur Ermittlung der maximalen Anziehungskraft, sondern nur der Dauerkurzschlußstrom berücksichtigt.

h) Die Teilleiter werden in jedem Fall von gleich grossen Strömen durchflossen.

2.3 Gleichgewichtsbedingungen

$$F_y = 0$$

$$F_y = F_m + F_t \cos \theta + F_t \cos \theta - F_a - F_a = 0$$

$$F_x = 0$$

$$F_x = F_t \sin \theta - F_t \sin \theta = 0$$

Aus Fig. 3 ist:

$$F_a = 2 F_t \cos \theta$$

$$F_y = F_m + 2 F_t \cos \theta - 4 F_t \cos \theta = 0$$

$$F_t = \frac{F_m}{2 \cos \theta} \tag{1}$$

Die Anziehungskraft F_m (Stosskraft) wird aus dem Biot-Savartschen Gesetz bestimmt.

$$F_m = \frac{2,04 I_t^2 L}{10^2 t}$$

Für ein Leiterelement:

$$d F_m = \frac{2,04 I_t^2 dx}{10^2 t(x)} = \frac{2,04}{10^2} I_t^2 \frac{dx}{\frac{x^2}{2p} + a}$$

Von $-L$ bis $+L$ integriert:

$$F_m = \frac{5,75 K I_t^2}{10^2} \sqrt{\frac{p}{a}} \arctan \sqrt{\frac{L^2}{2pa}} \text{ (kp)}$$

$$F_t = \frac{5,75 K I_t^2}{2 \cos \theta \cdot 10^2} \sqrt{\frac{p}{a}} \arctan \sqrt{\frac{L^2}{2pa}}$$

Unbestimmt in dieser Gleichung ist neben der totalen Seilzugkraft F_t die kontaktfreie Länge L , sofern sich die Teilleiter berühren (Fig. 3), und a , sofern die Teilleiter keine gemeinsame Berührungsstelle haben (Fig. 4). Zur Lösung dieser Unbekannten ist daher eine zweite Gleichung nötig.

2.4 Zweiter Berechnungsgang

In diesem zweiten Berechnungsgang wird unter Vernachlässigung der magnetischen Anziehungskraft nur die Seildehnung

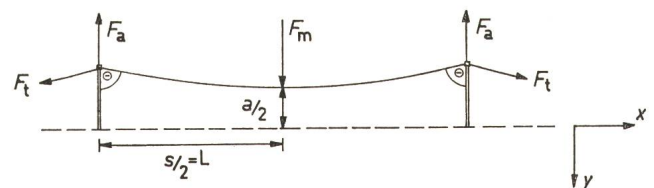


Fig. 4

Gleich wie Fig. 3, aber ohne Seilberührung
Bezeichnungen siehe Fig. 1, 2 und 3

nung und die statische Seilzugkraft für die Bestimmung der totalen Seilzugkraft in Betracht gezogen. Dabei werden neben den Vereinfachungen, wie sie im ersten Berechnungsgang unter lit. a...e aufgeführt wurden, zusätzlich folgende Annahmen getroffen.

j) Der Verlauf der Teileiter innerhalb eines Teilfeldes entspricht einer gebrochenen Geraden, wobei der Übergang von der kontaktfreien Zone zur Berührungszone eckig erfolgt (Fig. 5).

k) Eine Seildehnung wird nur in der kontaktfreien Zone angenommen, während das Seil in der Berührungszone sowie die Abspannelemente bzw. Verbindungsstellen als unelastisch betrachtet werden.

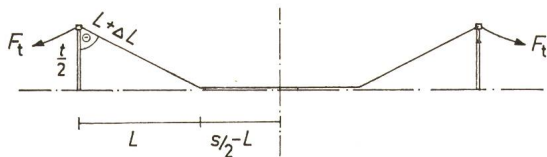


Fig. 5

Angenommener Verlauf eines Teileiters in einem Teilfeld bei Berücksichtigung der magnetischen Anziehungskraft
Bezeichnungen siehe Fig. 3

Aufgrund dieser Voraussetzungen setzt sich die totale Seilzugkraft aus der Summe der statischen Seilzugkraft und der Seildehnungskraft zusammen:

$$F_t = F_s + F_e \quad (2)$$

$$F_e = \frac{EA(2\Delta L)}{s} \quad (\text{Hooksches Gesetz})$$

$$\Delta L = \sqrt{L^2 + \left(\frac{t}{2}\right)^2} - L \quad (\text{nach Pythagoras})$$

Bei Seilberührung:

$$F_t = F_s + \frac{2EA}{s} \left[\sqrt{L^2 + \left(\frac{t}{2}\right)^2} - L \right]$$

$$\cos \theta = \frac{t}{2(L + \Delta L)}$$

Ohne Seilberührung:

$$F_t = F_s + \frac{2EA}{s} \left[\sqrt{\left(\frac{s}{2}\right)^2 + \left(\frac{t-a}{2}\right)^2} - \frac{s}{2} \right]$$

$$\cos \theta = \frac{t-a}{s + 2\Delta L}$$

Die Unbekannte L bzw. a wird aus den Gl. (1) und (2) bestimmt.

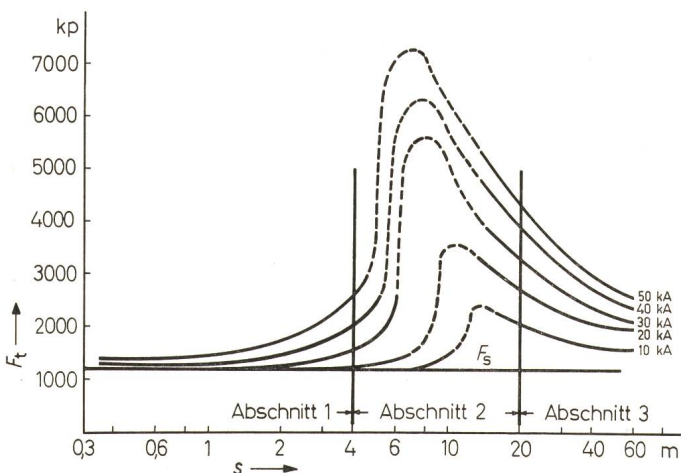


Fig. 6

Totale Seilzugkraft F_t pro Teileiter in Funktion der Teilfeldlänge s
Parameter: Kurzschlussstrom I_k ($t = 400$ mm, $F_s = 1200$ kp); F_s statische Seilzugkraft

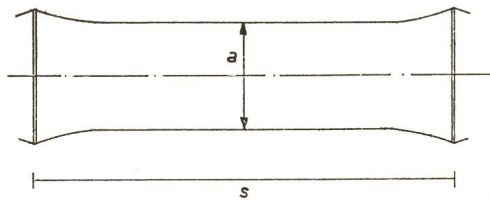


Fig. 7

Verlauf eines Teileiters in einem Teilfeld, für Teilfeldlängen von 0 bis ≈ 4 m
 $I_k \geq 30$ kA; $t = 400$ mm; $F_s = 1200$ kp; s Teilfeldlänge; a minimaler Abstand zwischen den Teileitern

Da Gl. (1) transzendenten Charakter hat, müssen die Unbekannten L bzw. a auf iterativem Wege bestimmt werden.

Bei 220-kV- und 380-kV-Freileitungen werden in neuester Zeit für Bündelleiter Seildurchmesser von ca. 30 mm bevorzugt. Aus Diskussionen, welche anlässlich der CIGRE-Tagung im August 1968 in Paris im CE 23 geführt wurden, ergab sich, dass es günstig wäre, für das Verhältnis Teileiterabstand/Seildurchmesser einen Wert von ca. 15 einzuhalten. Aus diesen Gründen wurden die Berechnungen für Aldrey-Seile von 550 mm^2 [6] und für einen Teileiterabstand von 400 mm durchgeführt. Dabei wurden folgende zwei typische Fälle unterschieden:

- Sammelschienen, welche zwischen zwei Masten mit einer statischen Zugkraft von 1200 kp pro Teileiter angespannt sind;
- Bündelleiter, welche für die Verbindung zwischen den Geräten dienen, mit einer statischen Zugkraft von 100 kp pro Teileiter.

In Fig. 6 sind die totalen Seilzugkräfte F_t in Funktion der Teilfeldlängen s für eine statische Zugkraft von 1200 kp auf-

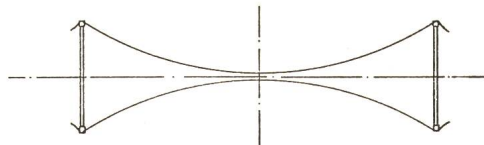


Fig. 8

Gleich wie Fig. 7, aber für Teilfeldlängen von $\approx 4...20$ m

gezeichnet. Dieses Diagramm kann für Kurzschlußströme ≥ 30 kA in drei typische Abschnitte aufgeteilt werden:

Abschnitt 1:

Für Teilfeldlängen von 0 bis ca. 4 m ist die Zugkraftherhöhung bei einem Kurzschluss klein. In diesem Fall tritt keine Seilberührung ein. Der Teileiterabstand ist über die ganze Teilfeldlänge gross, so dass die Anziehungskraft klein bleibt (Fig. 7) $\left[F_m = f\left(\frac{1}{t}\right) \right]$.

Abschnitt 2:

Für Teilfeldlängen von ca. 4...20 m beträgt die Zugkraftherhöhung ein Mehrfaches der statischen Zugkraft. In diesem Fall erfolgt eine Seilberührung. Der Teileiterabstand nimmt von den Enden des Teilfeldes gegen die Mitte zu rasch ab, so dass die Anziehungskraft gross wird (Fig. 8).

Abschnitt 3:

Für Teilfeldlängen grösser als 20 m beträgt die Zugkraftherhöhung ungefähr das Doppelte der statischen Zugkraft. Auch in diesem Fall erfolgt eine Seilberührung, jedoch ist die gemeinsame Länge der Seilberührung, welche keinen Beitrag für die Anziehungskraft mehr liefert, gross (Fig. 9).

In Fig. 10 sind die totalen Seilzugkräfte in Funktion der Teilfeldlänge für eine statische Seilzugkraft von 100 kp aufgezeichnet. Auch hier kann man wie in Fig. 6 die gleichen drei typischen Abschnitte für Kurzschlußströme ≥ 30 kA unterscheiden, wobei im ersten Abschnitt die Teilfeldlängen den Bereich von 0 bis ca. 1 m, im zweiten Abschnitt von ca. 1...50 m und im dritten Abschnitt grösser als 50 m umfassen.



Fig. 9
Gleich wie Fig. 7, aber für Teilfeldlängen grösser als 20 m

Die ermittelten Werte ergeben eine gute Übereinstimmung mit den in der Einleitung erwähnten praktischen Kurzschlussversuchen [1; 2].

Die Zeitdifferenz t_{max} zwischen dem Beginn des Kurzschlusses und dem Auftreten der maximalen Stosskraft hängt von der Zeitdauer t_i ab, welche für die Seilberührung der Teilleiter notwendig ist. In Fig. 11 ist die Zeitdauer in Funktion des Kurzschlußstromes für einen Bündelleiterabstand $t = 0,4$ m aufgezeichnet. Diese Werte sind unter der Annahme berechnet, dass die Teilfeldlängen ∞ sind. Daher ist für kleinere Teilfeldlängen die Zeitdauer t_i um ca. 10...30% höher als die berechnete.

Wenn die Seilberührungszeit t_i grösser ist als die Kurzschlußstromdauer, wird die beim Strom I_k maximal mögliche Zugspannungsspitze nicht erreicht. Dies setzt natürlich voraus, dass zufolge der Gleichgewichtsbedingungen überhaupt eine Seilberührung stattfinden würde, d.h. dass die Abstandhalter relativ weit voneinander entfernt sind.

Für Teilfeldlängen der Abschnitte 3 ist die Zeitdauer bis zum Auftreten der max. Stosskraft $t_{max} \approx 1,55 t_i$ für Teilfeldlängen der Abschnitte 2 ist $t_{max} \approx t_i$ [3].

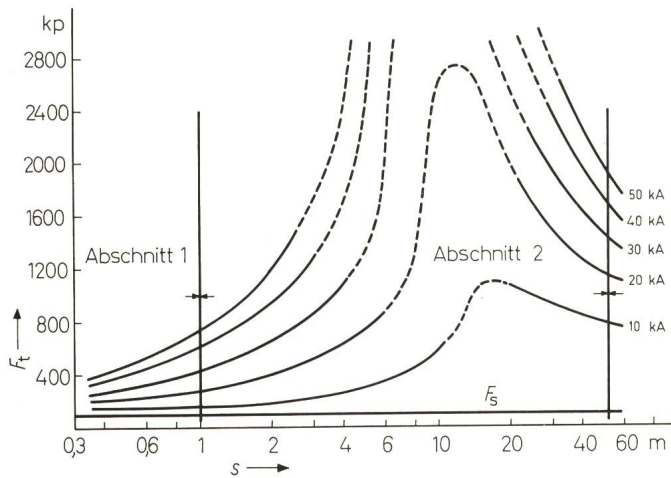


Fig. 10
Totale Seilzugkraft F_t pro Teilleiter in Funktion der Teilfeldlänge s
($t = 400$ mm, $F_s = 100$ kp)
Weitere Bezeichnungen siehe Fig. 6

Nach Aufhören des Stromstosses schwingen die Teilleiter mit ihrer natürlichen Frequenz, welche von der Seilspannung und Entfernung zwischen den Abstandhaltern abhängt. Bei diesen Schwingungen können durch Reflektionen die Zugkräfte zu beträchtlichen Werten gesteigert werden, die gegebenenfalls die maximale Zugspannungsspitze, welche durch die Kurzschlußströme verursacht wird, erreichen.

3. Dynamische Kurzschlusskräfte, hervorgerufen durch Beeinflussung der Nachbarphasen

Die Kurzschlußstossbeanspruchung zwischen den Phasen ist geringer als diejenige durch die Bündelleiteranziehung.

Zudem ist jene zeitlich wegen der Trägheit des Systems so verzögert, bis diese schon am Abklingen ist und einen permanenten Wert erreicht, der ungefähr 2,3mal kleiner ist als die Stosskraft [3]. Praktische Kurzschlussversuche [1] zeigen, dass bei einem Kurzschlußstrom von 30 kA und einer Kurzschlußdauer von 0,5 s die Kurzschlußstossbeanspruchung zwischen den Phasen nur 50% derjenigen zwischen den Bündelleitern beträgt. Bei 3phasigen Kurzschlüssen ist jedoch wegen der unzulässigen Annäherung der Phasenleiter die seitliche Auslenkung der Bündelleiterphasen wohl zu beachten; denn die äusseren Phasen R und T schwingen von der normalen Durchhangslage nach aussen, die mittlere hingegen wird durch gleichgrosse, aber entgegengesetzt wirkende Magnetkräfte am Ausschwingen verhindert. Wenn der Kurzschlussvorgang beendet ist, schwingen die äusseren Phasen nach innen. Gleiche Überlegungen sind für den 2phasigen Kurzschluss zu machen. Rechnerisch wird dieses Ausschwingen durch die Steighöhe h (nach Energie-satz) veranschaulicht [4] (Fig. 12):

$$h = \frac{2,04 I_k^4 t^2}{G^2 c^2} 10^{-3} \quad (\text{m})$$

Die seitliche Auslenkung der Phasen ergibt sich aus folgender Beziehung:

$$x = \sqrt{2hf - h^2}$$

4. Dynamische Kurzschlusskräfte, hervorgerufen durch Stromschleifen

Die Kurzschlussbeanspruchung, welche durch Stromschleifen hervorgerufen wird, ist wegen der grossen Abstände (ähnlich wie diejenige zwischen den Phasen) viel kleiner als die Stossbeanspruchung durch die Bündelleiter, so dass sie keinen wesentlichen Beitrag zur Zugspannungserhöhung liefert und für die Dimensionierung des Hochspannungsmaterials in bezug auf die Festigkeit nicht berücksichtigt werden muss.

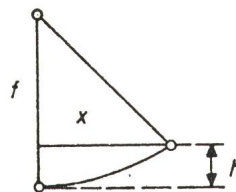


Fig. 12
Seitliche Auslenkung eines Bündels durch Beeinflussung der Nachbarphasen
 f Seildurchhang; x horizontale Auslenkung der Bündelleiter zwischen den Phasen; h Steighöhe

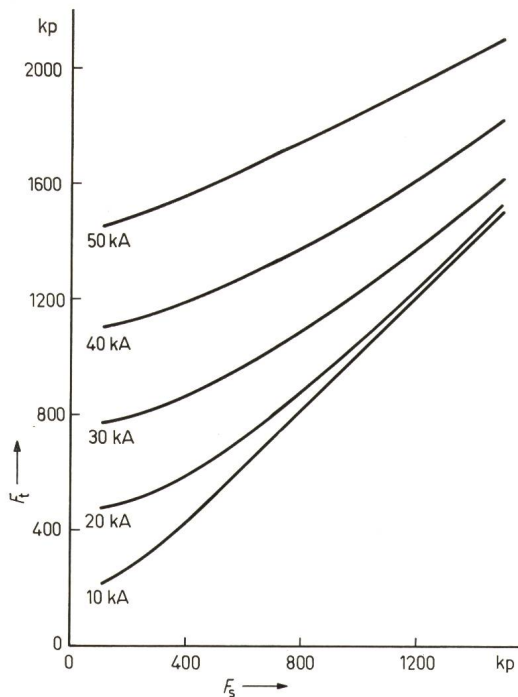


Fig. 13

Totale Seilzugkraft F_t pro Teilleiter in Funktion der statischen Seilzugkraft F_s

Parameter: Kurzschlußstrom I_k ($s = 2500$ mm; $t = 400$ mm)

5. Schlussfolgerungen

a) Die maximalen Stosskräfte, welche in den Schaltanlagen mit Bündelleitern auftreten, werden in erster Linie durch die Bündelleiteranziehung hervorgerufen. Diese maximalen Werte klingen nach ca. 40 ms auf einen Wert herab, der dem Dauerkurzschlußstrom entspricht.

b) Die Kurzschlußkräfte, welche zwischen den Phasen auftreten, ergeben keine nennenswerte Vergrößerung der maximalen Stosskräfte.

c) Die Kurzschlußkräfte, welche durch Stromschleifen bedingt sind, tragen keinen wesentlichen Anteil an den maximal auftretenden Stosskräften.

d) Eine Vergrößerung der Stosskräfte könnte durch ungleiche Aufteilung der Teilfeldlängen erfolgen.

e) Die mechanischen Schäden, welche durch das Aufschlagen der Teilleiter während des Kurzschlusses entstehen, sind minim und haben, wie praktische Versuche [1] zeigten, weder in elektrischer noch in mechanischer Hinsicht sichtbare Folgen.

f) Aus Fig. 6 und 10 können für Kurzschlußströme ≥ 30 kA folgende Schlüsse gezogen werden:

fa) Für Sammelschienen ($F_s = 1200$ kp): Um eine kleine Zugspannungserhöhung zu erreichen, sollten die Teilfeldlängen nicht grösser sein als ca. 3 m. Dabei entstehen minime Seilverkürzungen, wodurch nur kleine Auslenkungen in vertikaler Richtung erfolgen. Dieser Vorteil ist vor allem beim Ein-

bau von Scherentrennern wohl zu beachten. (Der Fig. 13 sind für eine Teilfeldlänge von 2,5 m zusätzlich die totalen Seilzugkräfte für variable Seilzugkräfte [100 bis 1500 kp] zu entnehmen.)

fb) Für Verbindungsleitungen ($F_s = 100$ kp) zwischen den Geräten sind Teilfeldlängen bis 1 m vorzusehen. Damit kann die totale Zugkraft kleiner gehalten werden als die maximal zulässige Umbruchkraft der Hochspannungsapparate. (In Fig. 14 ist die totale Seilzugkraft in Funktion der statischen Seilzugkraft für eine Teilfeldlänge von 1 m abzulesen.)

g) Die Druckbeanspruchung der Abstandhalter ist in jedem Fall kleiner als die Zugbeanspruchung der Teilleiter ($F_a = 2 F_t \cos \theta$).

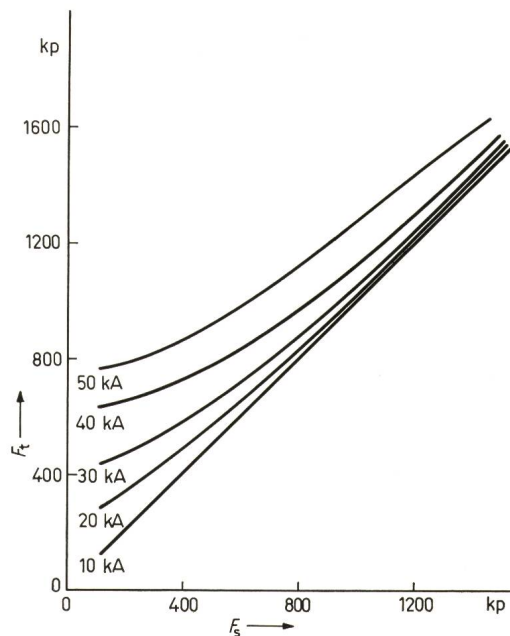


Fig. 14

Totale Seilzugkraft pro Teilleiter F_t in Funktion der stat. Seilzugkraft F_s

Parameter: Kurzschlußstrom I_k ($s = 1000$ mm; $t = 400$ mm)

Literatur

- [1] A. T. Atwood, M. H. Mills, D. I. Downs and H. M. Stone: Dynamic behavior of a 220-kV dead-end suspension bus during short circuit. Trans. AIEE Power Apparatus and Systems 81(1962)60, p. 153...169.
- [2] E. Wagner: Dauer- und Kurzschlussbeanspruchung von Bündelleitern in Hochspannungsschaltanlagen. ÖZE 18(1965)1, S. 18...25.
- [3] C. Manuzio: An investigation of the forces on bundle conductor spacers under fault conditions. Trans. IEEE Power Apparatus and Systems 86(1967)2, p. 166...184.
- [4] J. Biermann: Grenzleistungen von Schaltern, Schaltanlagen und Leitungssystemen. ETZ-A 76(1955)20, S. 728...735.
- [5] G. Koeppel: Schwere dynamische Beanspruchung von Scherentrennern. Brown Boveri Mitt. 49(1962)6, S. 226...229.
- [6] Aldrey für Freileitungen. Zürich, Schweizerische Aluminium-AG, 1963.
- [7] Regeln für Leitungseile. 2. Auflage. Publikation des SEV 0201.1960.

Adresse des Autors:

R. Zurbriggen, Dipl.-Ing. ETH, Motor Columbus Ingenieurunternehmung AG, 5401 Baden.

Kurzberichte — Nouvelles brèves

Ein Micro-Data-Recorder zeichnet auf einem 35 mm breiten, mit einem schwarzen Belag versehenen Film 5 Signale auf. Die Registrierungen sind in 5 nebeneinander liegenden Spuren enthalten. Der Messwert wird mit einem Diamant in die schwarze Fläche eingeritzt, sodass auf der schwarzen Grundfläche eine lichtdurchlässige helle Kurve entsteht. Der Frequenzbereich der gemessenen Signale kann zwischen 0 und 100 Hz liegen. Die Transportgeschwindigkeit des Filmes beträgt 0,5 mm/h...20 mm/s.

Eine Reihe von Sprechfunkgeräten wurde für das 70-cm-Band gebaut, weil die zur Verfügung stehenden Kanäle im 4- und 2-m-Band an vielen Orten stark überlastet sind. Die drei Gerätetypen, die mit einem Kanal oder mit fünf umschaltbaren Kanälen geliefert werden können, sind als abgesetzte Feststationen mit Fernbedienung, als Tischstationen und als Fahrzeugstationen erhältlich. Die Geräte haben Frequenzmodulation mit einem Hub von $\pm 2,8$ kHz und eine Leistung von 5 W.