Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke

Band: 59 (1968)

Heft: 16

Artikel: Die Teilfeldlänge in Bündelleitern

Autor: Möcks, L.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-916069

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 10.07.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

Die Teilfeldlänge in Bündelleitern

Von *L. Möcks*, Schwabach

621.315.145

Die Teilleiter einer Bündelleitung müssen in bestimmten Abständen distanziert werden. Für die sog. Teilfeldlänge werden Erfahrungswerte aus Praxis und Versuch zusammengetragen. Modellversuche zeigen eine zunehmende Bündelstabilität mit kleiner werdender Teilfeldlänge. Schliesslich wird ein Näherungsverfahren zur Berechnung der Teilfeldlänge abgeleitet und gute Übereinstimmung zwischen Praxis und Theorie gefunden.

Les conducteurs partiels d'un câble de groupe de lignes doivent être mutuellement écartés à des intervalles déterminés. Pour cette longueur partielle de champ on a assemblé les valeurs expérimentales résultant de la pratique et des essais. Des essais sur maquette démontrent une stabilité accrue des groupes pour des longueurs partielles de champ plus restreintes. On déduit enfin un procédé d'approximation pour le calcul des longueurs partielles de champ dont les résultats fournissent une bonne concordance entre les valeurs de la pratique et de la théorie.

1. Allgemeines

Die Teilleiter eines Bündelleiters werden im freien Feld durch Feldabstandhalter distanziert. Für die Entfernung zwischen den einzelnen Abstandhaltern, die sog. Teilfeldlänge, gibt es keine feste Regel. Im deutschen 220- und 380-kV-Netz sind Teilfeldlängen von 40...50 m üblich. Im Ausland, vor allem in den USA, werden die Abstandhalter in Entfernungen von 70...80 m eingebaut. Leider werden Erfahrungen zu diesem Thema nur selten publiziert. Zur Ermittlung einer optimalen Teilfeldlänge bietet die Praxis deshalb nur Anhaltspunkte.

Neben den rein technischen Aspekten hat die Teilfeldlänge auch erheblich wirtschaftliches Gewicht. Wird beispielsweise die Entfernung zwischen den Abstandhaltern anstatt 80 auf 40 m festgelegt, so verdoppelt sich die Anzahl der Feldabstandhalter. Wie sich eine solche Entscheidung auf die Errichtungs- und Unterhaltungskosten auswirkt, ist leicht vorstellbar.

Ziel dieser Untersuchung ist einmal die Darstellung der spärlichen Erfahrungswerte aus der Praxis, zum anderen die Ableitung einer theoretischen Regel für die Teilfeldlänge.

2. Gültigkeit der Untersuchungen

Die Darstellungen beziehen sich in Praxis und Theorie auf das waagerechte Zweier-Bündel. Diese Bündelart ist weit verbreitet und hat das anfänglich erprobte senkrechte Zweier-Bündel nahezu völlig verdrängt. Die Folgerungen aus den Untersuchungen gelten sinngemäss auch für das Dreier- und Vierer-Bündel, soweit wenigstens zwei Teilleiter in einer Ebene waagerecht liegen.

Die mechanische und elektrische Festigkeit der Feldabstandhalter wird durch die Untersuchung nicht berührt. Stillschweigend wird vorausgesetzt, dass das Bauteil «Feldabstandhalter» den anfallenden Beanspruchungen gewachsen ist.

3. Gründe zur Distanzierung der Teilleiter

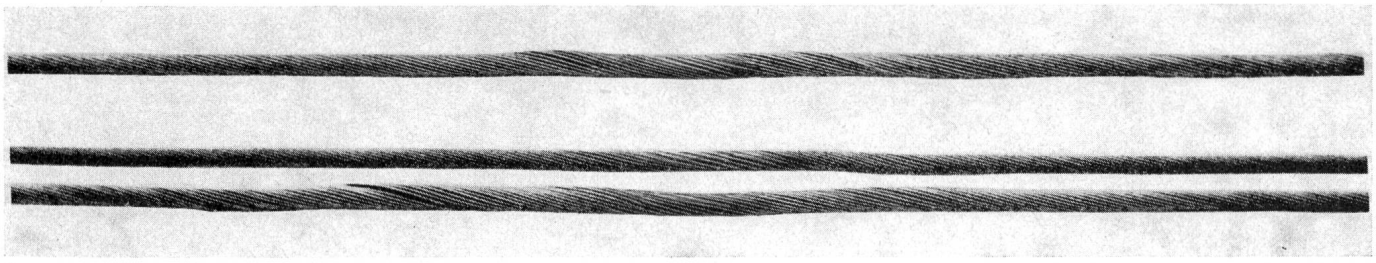
Wird ein waagerechtes Zweier-Bündel über 300...400 m ohne Feldabstandhalter verlegt, so werden sich die Teilleiter durch Wind und Stromkräfte berühren. Bei böigen Winden kommt es zu sog. Pendelschwingungen. Sind die Schwingungen gegenläufig, so schlagen die Teilleiter mit Wucht aneinander. Dabei wird die Seiloberfläche deutlich deformiert.

Fig. 1 zeigt die Teilleiter eines Dreier-Bündels nach dem Zusammenschlagen durch Stromkräfte. Die äussere Drahtlage hat sich bei allen Leitern sichtlich gelockert. Es ist fraglich, ob ein derartig beschädigter Leiter auf lange Sicht betriebstüchtig bleibt. Die Korrosionsfestigkeit nimmt ab, während die Randfeldstärke ansteigt und Glimmerscheinungen begünstigt. Windkräfte erzeugen grundsätzlich ähnliche Schwingungen, so dass hier mit den gleichen Schäden wie bei Stromkräften zu rechnen ist.

Steht der Bündelleiter während des Zusammenschlagens durch Wind unter hoher thermischer Belastung, so können die Stromkräfte ein Aneinanderkleben der Teilleiter bewirken. Unweigerlich damit verbunden ist ein Reibungsvorgang, der ebenfalls Seilschäden erzeugt.

Abgesehen von den rein mechanischen Gesichtspunkten sollte der Teilleiterabstand auch aus elektrischen Gründen im freien Feld erhalten bleiben. Nur dann ist der Vorteil des niedrigen Wellenwiderstandes gegeben. Beispielsweise hat ein Zweier-Bündel mit 380 kV Betriebsspannung eine um 25 % höhere natürliche Leistung als eine Einseilleitung.

Die Randfeldstärke des Bündelleiters beeinflusst die elektrische Störfreiheit der Leitung entscheidend. Mit abnehmendem Teilleiterabstand wächst die Randfeldstärke. Die elektrische Festigkeit der Leitung nimmt ab und es kann zu Funk-, Fernseh- und Radiostörungen kommen.



1967-78

Fig. 1
Seilschäden nach dem Zusammenschlagen der Teilleiter

Auf das dynamische Verhalten des Bündels im Kurzschlussfall, das eng mit der Feldteilung verknüpft ist, braucht bei der Freileitung im Gegensatz zur Schaltanlage keine Rücksicht genommen zu werden. Aus diesem Grunde orientiert sich die hier gesuchte Teilfeldlänge nicht am Kurzschlußstrom. Das kurzfristige Zusammenschlagen der Teilleiter während eines Fehlerfalles soll ausdrücklich zugelassen werden. Dieser Standpunkt ist leicht zu vertreten, da der Kurzschlussfall äusserst selten, und dann nur für kurze Zeit (etwa 0,2 s), auftritt. Die Fehlerzeit spielt bei der Frage des Zusammenschlagens durch Kurzschlusskräfte eine wichtige Rolle. Bei kleinen Zeiten und schweren Teilleitern geraten die Leiter zwar in Schwingungen, sie müssen aber nicht zwangsläufig zusammenschlagen.

4. Teilfeldlängen in Versuchsstationen und Fernleitungen

Auf einer Versuchsleitung der Ohio-Edison Comp. wurde ein waagerechtes Zweier-Bündel getestet [1][1]). Das Al/St-Seil hatte einen Durchmesser von etwa 30 mm und der Teilleiterabstand betrug 46 cm. In Spannfeldern mit 250...330 m kam es ohne Abstandhalter bei kräftigen Winden häufig zum Zusammenschlagen der Teilleiter. Es gab dabei einen weithin vernehmlichen, peitschenartigen Knall. Nach dem Einbau der Feldabstandhalter wurden die mechanischen Kontakte nur noch in einem Feld mit 94 m Teilfeldlänge beobachtet. Daraufhin reduzierte man die Teilfeldlänge auf 76 m und die Kontakte blieben aus. Leider fehlt in dem Bericht ein Hinweis auf die Seilzugspannung bzw. EDS[2]).

F. Cahen und *F. Pelissier* [2] berichten über Versuche mit einem waagerechten Zweier-Bündel in einer 500-kV-Anlage. Bei einer Spannweite von 500 m und einem Teilleiterabstand von 40 cm schlugen noch bei 15 m/s Windgeschwindigkeit die im Feld nicht distanzierten Leiter zusammen. Bei 250 m Spannweite kam es erst bei 25 m/s zum Kontakt. Nach einem einmaligen Anstoss pendelten die Teilleiter 8...20mal, ehe sie zur Ruhe kamen. Es werden pro Spannfeld ein bis zwei Distanzstücke empfohlen. Im übrigen wird eindringlich auf die Gefahr des Aneinanderklebens der Teilleiter durch Stromkräfte hingewiesen.

Der Hornisgrinde-Bericht [3] schlägt im Abschnitt «Tanzen, Hochschnellen . . .» vor, die Abstände zwischen den Feldabstandhaltern und den Aufhängepunkten kürzer zu halten als zwischen den Abstandhaltern im freien Feld. Die Stabilität des Bündels wird dadurch verbessert und die Rückdrehung des umgeschlagenen Bündels erleichtert. In der Nähe der Trag- und Abspannklemmen wird eine Teilfeldlänge von etwa 15 m empfohlen, die bis zur Feldmitte höchstens auf 60 m ansteigen soll.

Mather und *Hard* [4] berühren in ihrem ausgezeichneten Bericht über Feldabstandhalter das Thema «Teilfeldlänge» nur am Rande. Sie empfehlen abschliessend, eine Teilfeldlänge von 76 m (250 Fuss) nicht zu überschreiten. In Mastnähe soll dieser Abstand geringer sein.

Edwards und *Boyd* [5] berichten über Untersuchungen an Bündelleitern und deren Verhalten unter definierten Randbedingungen. Auf einer Versuchsleitung mit waagerechtem Zweier-Bündel und 45,4 cm Teilleiterabstand wurde bei Teilfeldlängen von 120 m unter «normalen Bedingungen» kein Berühren der Teilleiter registriert. Als Leiterseil war das Al/St-Seil «Hawk» mit 12 bzw. 17% der Seilbruchlast als Zugspannung eingesetzt.

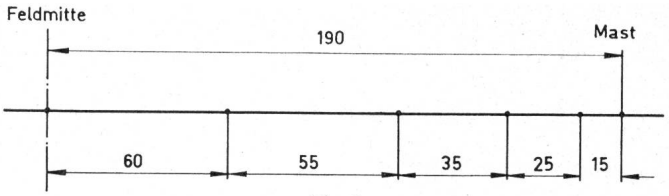


Fig. 2
Feldabstandhalter-Einbauschema
Masse in m

Die schwedische 380-kV-Leitung von Harspranget nach Hallsberg [6] hat je Phase ein waagerechtes Zweier-Bündel mit dem Al/St-Seil «Curlew» (31,7 mm ⌀). Der Teilleiterabstand beträgt 45 cm, die Zugspannung bei 0 °C, ohne Zusatzlast, 6 kp/mm². Nach umfangreichen Versuchen an Testleitungen wurde die Teilfeldlänge mit 130 m festgelegt. Diese Teilfeldlänge entsprach auch wirtschaftlichen Gesichtspunkten. Ein gelegentliches, statistisch einkalkuliertes Zusammenschlagen der Teilleiter wird in den schwedischen Bündelleitungen ausdrücklich zugelassen. Elektrische Versuche zeigten starken Koronaeinsatz, sobald der Teilleiterabstand durch Windeinfluss auf Werte unter 20 cm zurückging.

Die erste 400-kV-Leitung in Polen hat ein Zweier-Bündel mit 40 cm Teilleiterabstand [7]. Die Entfernung der Abstandhalter beträgt etwa 90 m. Das Al/St-Seil hat 402,3 mm² Aluminium- und 52,15 mm² Stahl-Querschnitt. Die höchste bei Zusatzlast auftretende Zugspannung beträgt 11 kp/mm². Die Regelspannweite liegt bei 413 m.

Das RWE hat in Deutschland die grössten Erfahrungen mit Bündelleitungen [8]. Für das Zweier-Bündel wurden im Jahre 1959 Teilfeldlängen von 15...60 m vorgesehen. Für das 380-m-Spannfeld wurden, von der Mitte ausgehend, Längen gemäss Fig. 2 vorgeschrieben. 1962 wurden die Abstände korrigiert. Für die gleiche Spannfeldlänge galt nun das Schema in Fig. 3.

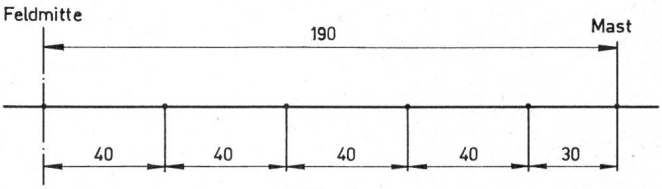


Fig. 3
Feldabstandhalter-Einbauschema
Masse in m

Die maximale Entfernung zwischen den Abstandhaltern wurde merklich verkleinert. Gründe hierfür sind nicht bekannt geworden. In Spannfeldern über 480 m wurden vereinzelt maximale Teilfeldlängen von 45 m zugelassen.

Diese Angaben gelten sowohl für das waagerechte als auch für das senkrechte Zweier-Bündel. Auch im Vierer-Bündel, wo man die abgesetzte Anordnung der Feldabstandhalter bevorzugt, werden Teilfeldlängen von 45 m niemals überschritten. Eine Teilfeldlänge von 60 m wird, soweit bekannt, auch von anderen deutschen Elektrizitätswerken nicht überschritten.

Die neuerrichtete erste 400-kV-Freileitung in Mexiko [9] besitzt ein waagerechtes Zweier-Bündel mit 32 mm Al/St-Seil. Der Teilleiterabstand beträgt 45 cm; die Entfernung zwischen den Abstandhaltern liegt bei maximal 70 m.

Die Auswertung von Literatur und Praxis erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit. Trotzdem lassen sich zusammenfassend folgende Gesichtspunkte herausstellen:

[1]) Siehe Literatur am Schluss des Aufsatzes.
[2]) Every day stress.

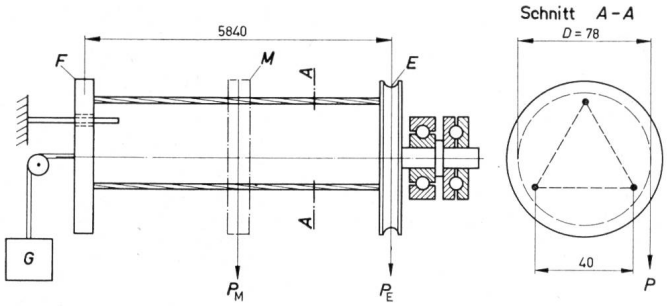


Fig. 4
Bündelleitermodell
Masse in mm
E Drehmoment-Meßscheibe (Spannfeldende); *F* Abspannscheibe (verdrehungssicher); *G* Belastungsgewicht; *M* Drehmoment-Meßscheibe (Spannfeldmitte); *P* Drehkraft; P_E Drehkraft an *E*; P_M Drehkraft an *M*

a) In deutschen Bündelleitungen überwiegt die Teilfeldlänge von 45 m; Teilfeldlängen von 60 m sind selten.

b) In anderen Ländern, vor allem in den USA, liegen die Teilfeldlängen bei maximal 76 m, wenn ein Zusammenschlagen der Teilleiter mit einiger Sicherheit ausbleiben soll.

c) Die Verkürzung der Teilfeldlängen zum Mast hin scheint sich überall bewährt zu haben.

5. Einfluss der Teilfeldlänge auf die Stabilität des Bündelleiters

Bündelstabilität ist der Widerstand eines Bündelleiters gegen Verdrehen oder Verwickeln. Unter dem Einfluss äusserer Kräfte, wie Wind und Sturm, oft verbunden mit Seiltanzen, können sich die Teilleiter miteinander verwickeln [10]. In diesem Zustand ist die Möglichkeit einer gegenseitigen Beschädigung der Leiter gross. Die Angelegenheit wird kritisch, wenn die Teilleiter in der unnatürlichen Lage verharren und sich nicht aus eigener Kraft zurückdrehen.

Zur qualitativen Untersuchung der Bündelstabilität in Abhängigkeit von der Teilfeldlänge wurde ein Modell entwickelt. Fig. 4 zeigt eine schematische Darstellung des Modells.

Die Untersuchungen wurden an einem Dreier-Bündel durchgeführt. Die Teilleiter sind auf den Eckpunkten eines gleichseitigen Dreiecks angeordnet. Der Teilleiterabstand beträgt 4 cm, die Modellänge 584 cm. Als Teilleiter wurden hochflexible Cu-Seile von 10 mm² Querschnitt verwendet. Die Steifigkeit der Leiter war gering. Auf der linken Seite ist die Bündelabspannung verdrehungssicher, aber in Seilachse verschiebbar angeordnet. Hier erfolgt die reibungsarme Zugbelastung *G* des Bündels über eine Rolle. Auf der rechten Seite ist das Bündel fest abgespannt, in sich aber wahlweise verdrehbar oder starr. Zu den Versuchen wurden starre Rahmenfeldabstandhalter nach Fig. 5 verwendet. Das Dreh- bzw. Torsionsmoment wurde über die Kreisscheibe nach Fig. 4 eingeleitet bzw. gemessen.

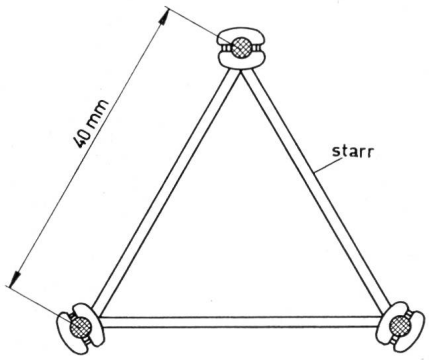


Fig. 5
Dreierbündel-Modellabstandhalter

Die erste Versuchsreihe beschäftigte sich mit der Zahl der Feldabstandhalter pro Spannfeld. Bei den Versuchen wurde das Drehmoment im Spannfeld an der Kreisscheibe M gemessen. Die beiden Endabspannungen E und F waren verdrehungssicher gehalten.

Fig. 6 zeigt den Zusammenhang zwischen Drehmoment, Zuglast und Anzahl der Abstandhalter. Demnach nimmt sowohl das zu- als auch das rückdrehende Moment etwa linear mit der Zuglast zu. Weiter nehmen beide Drehmomente mit der Zahl der Abstandhalter zu.

In der zweiten Versuchsreihe wird der Verlauf des zudrehenden Moments während einer vollen Drehung (360°) untersucht. Ein Ende der Modellabspannung war fest, am anderen wurde das Moment aufgebracht (Fig. 4). Das Ergebnis dieser Untersuchung ist in Fig. 7 dargestellt. Unabhängig von der Zahl der Abstandhalter durchläuft jede Kurve ein Maximum,

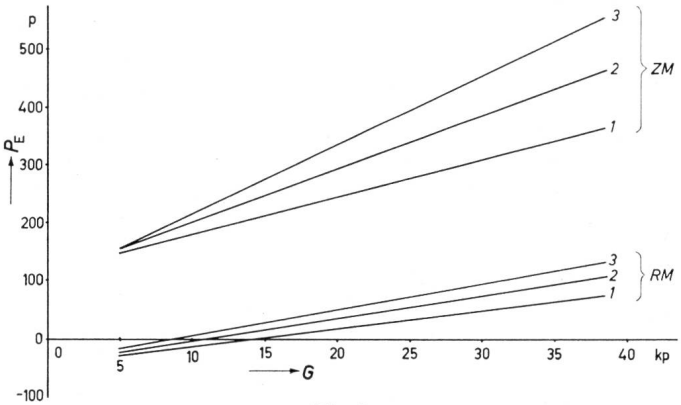


Fig. 6
Abhängigkeit der Drehkraft von der Anzahl der Rahmenfeldabstandhalter und der Zuglast
G Zuglast; P_E Drehkraft; *ZM* zudrehendes Moment; *RM* rückdrehendes Moment; *1, 2, 3* Zahl der Abstandhalter

das bei etwa einer halben Drehung (180°) liegt. Das absolute Spitzenmoment nimmt deutlich mit der Zahl der Abstandhalter zu.

Ein direkter Vergleich beider Versuchsreihen mit Absolutwerten ist nicht sinnvoll. Wie erwähnt, wurden die Momente in beiden Versuchen an ungleichen Orten aufgebracht, so dass, absolut gesehen, unterschiedliche Ergebnisse die Folge sind. In der Tendenz zeigen die Ergebnisse jedoch in die gleiche Richtung.

Die Stabilität eines Bündelleiters ist nach den vorliegenden Untersuchungen eine Funktion der Zuglast im Bündel und der Anzahl der Feldabstandhalter. Mit wachsender Zuglast steigt die Bündelstabilität ebenso an wie mit wachsender Zahl der Abstandhalter.

Da die Untersuchungen am Modell unter rein qualitativen Gesichtspunkten durchgeführt wurden, lassen sie sich auf andere Bündelarten ohne weiteres übertragen.

6. Theoretische Betrachtung der Teilfeldlänge

Versuche und Praxis haben gezeigt, dass nicht distanzierte Teilleiter durch Windkräfte leicht und häufig zusammenschlagen. Der Feldabstandhalter muss aus diesem Blickwinkel in erster Linie imstande sein, diese Windkräfte aufzunehmen und den mechanischen Kontakt zu verhindern. Im Gegensatz zur Schaltanlage kann man in der Freileitung den Einflussbereich

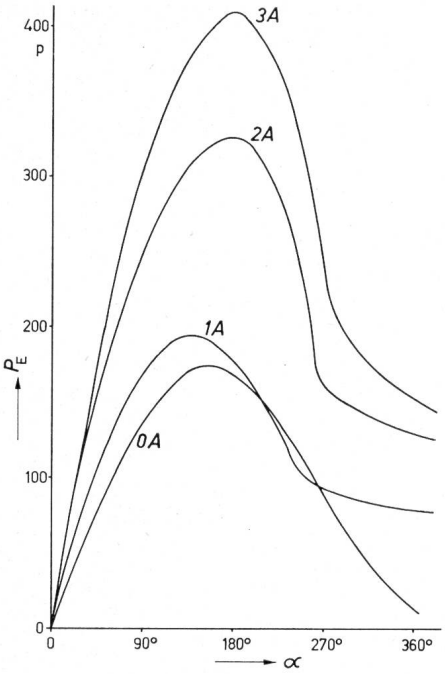


Fig. 7
Zusammenhang zwischen Drehkraft P_E und Drehwinkel α bei zunehmender Anzahl der Rahmenabstandhalter
Gemessen wurde das zudrehende Moment
A Abstandhalter;
Zuglast $G = 35$ kp

des Feldabstandhalters auf die Teilfeldlänge tatsächlich auf diesen einen Punkt beschränken. Kurz- und langwellige Schwingungen, d.h. Vibrationen und Tanzen, beanspruchen wahrscheinlich den Abstandhalter stärker als vom Wind ausgelöste Pendelschwingungen. Hier geht es aber, wie bereits erwähnt, nicht um die zulässige Abstandhalter-Beanspruchung, sondern um die Teilfeldlänge, und darauf haben sowohl Vibrationen als auch Tanzen nur zweitrangigen Einfluss.

Wird ein waagerechtes Zweier-Bündel in der Bündelebene einseitig von einem Luftstrom konstanter Grösse beaufschlagt, so wird das Bündel so weit ausschwingen, bis Gleichgewicht zwischen Windlast und Rückstellkraft herrscht. In den wenigsten Fällen ist aber diese Windlast über der gesamten Spannweite gleichmässig verteilt. So kommt es zum unterschiedlichen Ausschwingen der einzelnen Teilfeldlängen. Besonders deutlich wird das Bild, wenn nur eine Teilfeldlänge innerhalb des Spannungsfeldes vom Wind beaufschlagt wird. Dieser Grenzfall soll zur Ableitung der theoretischen Zusammenhänge benutzt werden. Die Allgemeingültigkeit der Lösung leidet unter dieser Vereinfachung nicht.

Neben der gewichtsbedingten Rückstellkraft gibt es noch eine Feder- bzw. Torsionskraft des tordierten Teilleiters, die versucht, den Leiter in die ursprüngliche Lage zurückzuführen (Fig. 8c).

Fällt die Windlast plötzlich auf Null ab, so gerät der Teilleiter in eine freie Pendelschwingung, deren Amplitude je nach dem Grad der Dämpfung schnell oder langsam abnimmt. Sind dem Wind Böen überlagert, die periodisch auftreten, so kommt es zu freien und erzwungenen Pendelschwingungen. Darüber liegen noch nicht veröffentlichte Untersuchungen des CIGRE-Studienkomitees Nr. 6 vor. Die Ergebnisse zeigen, dass dem Wind immer Böen mit einer mehr oder weniger grossen Regelmässigkeit überlagert sind.

Treten angestossene oder erzwungene Schwingungen auf, so ist mit relativ grossen Pendelamplituden zu rechnen. Die Teilleiter liegen hintereinander im Luftstrom, werden also zu unterschiedlichen Zeiten vom Wind getroffen. Ausserdem ist eine aerodynamisch begründete, gegenseitige Beeinflussung vorhanden. Eine phasenverschobene Pendelschwingung beider Teilleiter ist deshalb physikalisch leicht erklärlich und möglich. So kommt es zu den gegenläufigen Pendelschwingungen der Teilleiter, wie sie in der Praxis oft beobachtet werden.

Zur Entwicklung der Theorie wird der vom Wind beaufschlagte Bündelabschnitt A—B in Fig. 8 aus der Leitung herausgetrennt und untersucht (Fig. 9).

Der pendelnde Teilleiter nach Fig. 9c darf als physikalisches Pendel angesprochen werden. Hierfür gilt die Bewegungsgleichung [11]:

$$\mathrm{d}m\, y\, \alpha'' + \mathrm{d}m \cdot g \sin\alpha = 0 \qquad (1)$$

worin

$\mathrm{d}m$ Massenelement des Leiters (kg)
y Teilfelddurchhang an beliebiger Stelle χ (cm)
α Schwingwinkel der Pendelschwingung
g Erdbeschleunigung $= 9{,}81$ cms^{-2}

Summiert man beide Glieder und multipliziert mit y, so ergibt sich folgende Gleichung:

$$\sum \mathrm{d}m \cdot y^2 \alpha'' + \sum \mathrm{d}m \cdot g\, y \sin\alpha = 0 \qquad (2)$$

In dieser Gleichung ist:

$$\sum \mathrm{d}m \cdot y^2 = I \qquad (3)$$

worin
I Massenträgheitsmoment des durchhängenden (kp cm s^{-2}) Leiterseiles, bezogen auf die Drehachse
und

$$\sum \mathrm{d}m \cdot g\, y = M \qquad (4)$$

worin
M statisches Moment des durchhängenden Leiterseiles, bezogen auf die Drehachse (kp cm), für das auch geschrieben werden kann:

$$M = m g f_s = G f_s \qquad (5)$$

worin
f_s Schwerpunktabstand im Teilfeld von der Drehachse (cm)
G Gewicht des Leiterseiles mit der Teilfeldlänge l (kp)

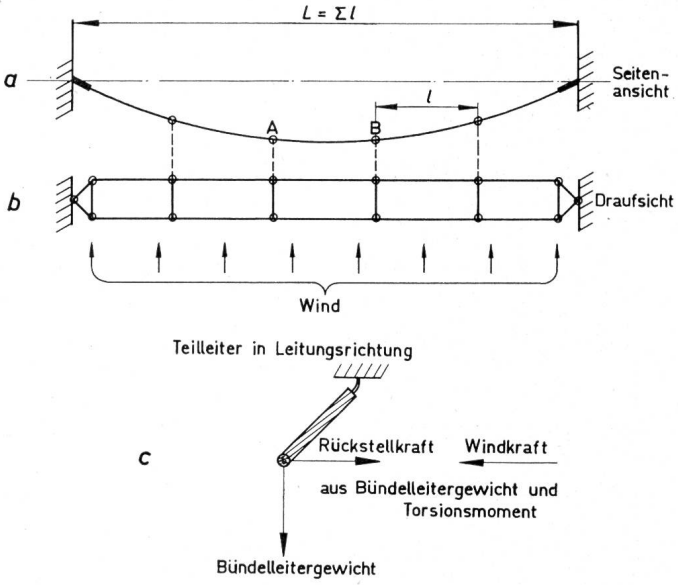


Fig. 8
Kräfte am Bündelleiter
a Spannfeld (Seitenansicht); *b* Spannfeld (Draufsicht); *c* Kräfte am Teilleiter
L Spannweite; *l* Teilfeldlänge

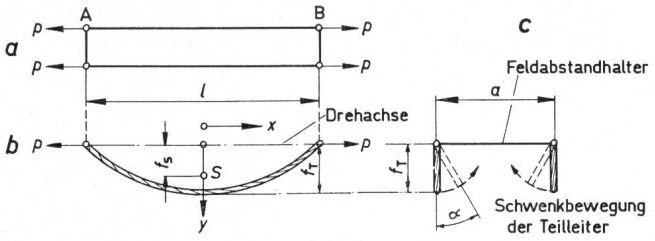


Fig. 9
Bündelabschnitt A – B
a Teilfeld (Draufsicht); *b* Teilfeld (Vorderansicht); *c* Teilfeld (Seitenansicht
l Teilfeldlänge; f_T Teilfelddurchhang; f_s Schwerpunktabstand von Drehachse; *S* Schwerpunkt des Seilbogens; *a* Teilleiterabstand; *p* Zugkraft; *x* und *y* Koordinaten; α Drehwinkel

Zur Ermittlung des Massenträgheitsmomentes *I* muss Gl. (3) integriert werden. Im Falle des leicht durchhängenden Teilleiters gilt näherungsweise:

$$dm = \frac{q}{g}\,dx \tag{6}$$

und

$$y = \frac{4 f_T}{l^2}\left(\frac{l^2}{4} - x^2\right) \tag{7}$$

worin

q Leiterseilgewicht (kp cm^{-1})
f_T max. Teilfelddurchhang (cm)
l Teilfeldlänge (cm)

Die Integration von Gl. (3) ergibt unter Berücksichtigung der festgelegten Grenzen:

$$I = \frac{8}{15} \cdot \frac{q}{g}\, l f_T^2 \tag{8}$$

Für das statische Moment erhält man mit den Gl. (4), (6) und (7) in ähnlicher Weise:

$$M = \frac{2}{3}\, q\, l f_T = f_s\, q\, l \tag{9}$$

Da eine rein qualitative Betrachtung der Pendelschwingung angestrebt wird, darf man in Gl. (2) sin α durch den α ersetzen. Streng genommen gilt diese Näherung nur für kleine Ausschläge. Für die Schwingungsdauer T_p erhält man schliesslich:

$$T_p = 2\pi\sqrt{\frac{I}{M}} \tag{10}$$

worin

T_p Schwingungsdauer des physikalischen Pendels (s)

Setzt man für *I* und *M* die Gl. (8) und (9) in Gl. (10) ein, so findet man:

$$T_p = 2\pi\sqrt{\frac{4}{5} \cdot \frac{f_T}{g}} \tag{11}$$

Mit der Schwingungsdauer T_m und der Länge f_m des mathematischen Pendels:

$$T_m = 2\pi\sqrt{\frac{f_m}{g}} \tag{12}$$

ist Gl. (11) über den Zusammenhang:

$$f_m = \frac{4}{5} f_T \tag{13}$$

verbunden.

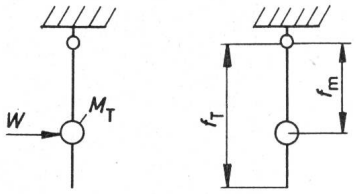


Fig. 10
Ersatzschaltbild für pendelnden Teilleiter
f_T Teilfelddurchhang; f_m Pendellänge; M_T Masse des Pendels; *W* Windlast

Zeitweilig wurde in älteren Untersuchungen zur Bestimmung der Pendeldauer eines Leiterseiles die Bewegungsgleichung des mathematischen Pendels verwendet. Für f_m wurde dabei $f_m = 2/3\, f_T$ gesetzt. Gegenüber der genauen Gl. (13) bringt dies in Bezug auf die Schwingungsdauer einen Fehler von 8,7 %.

Für die weiteren Untersuchungen wird die Bewegungsgleichung des mathematischen Pendels unter Berücksichtigung des Korrekturfaktors nach Gl. (13) verwendet.

Wird das Teilleiterpendel mit einer konstanten Windlast *W* beaufschlagt (Fig. 10), und werden nur kleine Ausschläge vorausgesetzt, so gilt die folgende Bewegungsgleichung:

$$m f_m \alpha'' + m g \alpha = W \tag{14}$$

Gl. (14) wird gelöst, indem man das Störglied zunächst gleich Null setzt. Man erhält eine homogene Differentialgleichung mit der Lösung:

$$\alpha_I = C_1 \sin \omega_E \cdot t + C_2 \cos \omega_E \cdot t \tag{15}$$

mit

$$\omega_E = \sqrt{\frac{g}{f_m}} \tag{16}$$

worin

ω Pendeleigenkreisfrequenz (s^{-1})

Das partikuläre Integral ergibt sich zu:

$$\alpha_{II} = \frac{W}{G} \tag{17}$$

Die vollständige Lösung lautet dann:

$$\alpha = \alpha_I + \alpha_{II} = C_1 \sin \omega_E \cdot t + C_2 \cos \omega_E \cdot t + \frac{W}{G} \tag{18}$$

Mit den Anfangsbedingungen:

a) für $t = 0$ ist $\alpha = 0$ (Ausschlag)
b) für $t = 0$ ist $\alpha' = 0$ (Geschwindigkeit)

erhält man schliesslich:

$$\alpha = \frac{W}{G}(1 - \cos \omega_E \cdot t) \tag{19}$$

Der Ausdruck W/G beinhaltet die neue Schwingungsmittellage des Pendels, um den das Pendel mit der Winkelamplitude:

$$\alpha = \frac{W}{G} \tag{20}$$

harmonisch schwingt.

Wird das Pendel durch einen Windstoss (Böe) angeregt, so kommt es ebenfalls zu Schwingungen. Ein solcher Windstoss

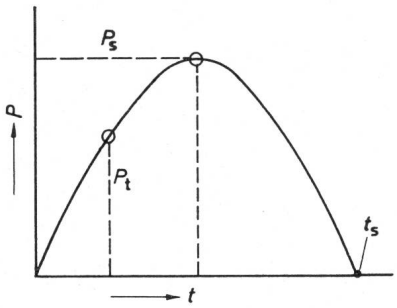


Fig. 11
Stossimpuls
P Stosskraft; *t* Stosszeit; P_s Scheitelwert der Stosskraft; P_t zeitabhängige Grösse der Stosskraft
t_s Stossdauer

kann beispielsweise als Stossimpuls in Form einer halben Sinuslinie dargestellt werden (Fig. 11). Für das schwingende Pendel gilt dann folgende Bewegungsgleichung:

$$\alpha'' + \frac{g}{f_m} \sin \alpha = W = P_S \cdot \sin \omega_S \cdot t \tag{21}$$

ω_S ist die Erregerkreisfrequenz, die sich bei gedachter Fortsetzung der halben Sinuslinie ergibt.

$$\omega_S = \frac{2\pi}{T} = \frac{2\pi}{2\,t_S} = \frac{\pi}{t_S} \tag{22}$$

Gl. (21) ist in der exakten Darstellung nicht geschlossen lösbar. Setzt man wieder kleine Ausschläge voraus, so lautet die Lösung mit $\sin\alpha = \alpha$:

$$\alpha = \frac{P_S}{\omega_E^2 - \omega_S^2} \sin\omega_S \cdot t \tag{23}$$

mit

$$\omega_E = \sqrt{\frac{g}{f_m}} \tag{16}$$

Im Resonanzfall bei $\omega_E = \omega_S$ werden die Pendelausschläge unendlich gross. Dies gilt nur für den dämpfungsfreien Fall, der hier zur Vereinfachung des Problems vorausgesetzt wurde. In der Praxis werden die Ausschläge durch die vorhandene Eigendämpfung im Seil und in der Luft auf endliche Werte begrenzt.

Eine direkte Bestimmung von α scheitert aus vielen Gründen. Die auftretenden Windkräfte sind zeitlich nicht konstant und im Scheitelwert veränderlich. Hinzu kommen aero-dynamische Zusammenhänge zwischen den beiden Teilleitern, die rechnerisch nur sehr schwer erfassbar sind. Der Anrege- oder Resonanzfall ist aber bei Winden und Stürmen durch die enorme Böendichte und Verteilung immer gegeben. Mit Pendelschwingungen muss deshalb ständig gerechnet werden.

Setzt man auch im Hinblick auf die Erfahrungen aus der Praxis ein Gegeneinanderschwingen der Teilleiter voraus, so darf der Teilfelddurchhang in Abhängigkeit vom Ausschwingwinkel einen bestimmten Wert nicht überschreiten, wenn die Teilleiter sich nicht berühren sollen. Unter Beachtung der Fig. 9 ergibt sich für den ausgeschwungenen Teilleiter folgende Beziehung zwischen Teilleiterabstand a und Teilfelddurchhang f_T:

$$a = 2 f_T \sin\alpha \tag{24}$$

Ersetzt man unter dem Gesichtspunkt:

$$\operatorname{tg}\alpha = \frac{W}{G} \tag{25}$$

und

$$_T = \frac{q\,l^2}{8\,H} \tag{26}$$

worin

H Zuglast im Leiterseil (kp)

den sin durch den tg, so erhält man für die Teilfeldlänge mit Gl. (24) und (26):

$$l \leqq 2\sqrt{a\,\frac{p}{\delta}}\,\sqrt{\frac{\sqrt{1+\operatorname{tg}^2\alpha}}{\operatorname{tg}\alpha}} \tag{27}$$

worin

δ spezifisches Leiterseilgewicht (kp cm^{-3})

Die Teilfeldlänge l ist bei konstanten Leitungsdaten nur abhängig vom Schwingwinkel α. Demnach liefert Gl. (27) für einen bestimmten Schwingungswinkel α die Teilfeldlänge l, bei der sich die Scheitelpunkte der durchhängenden Teilleiter eben berühren. Auf die endlichen Abmessungen des Leiters quer zur Seilachse (Seildurchmesser) wird dabei keine Rücksicht genommen. Die Leiterseile werden als Linien angesetzt.

Sind die Windkräfte merklich grösser als das Eigengewicht des Teilleiters, so wird der Ausschlagwinkel $\alpha = 90^0$ leicht überschritten. In diesem Falle gilt:

$$l \leqq 2\sqrt{a\,\frac{p}{\delta}} \tag{28}$$

Das zweite Glied in Gl. (27) kann demnach als Korrekturfaktor für den Ausschwingwinkel $<90^0$ dargestellt werden.

Gl. (28) bietet gegen Berührung der Teilleiter bei gegenläufigen Pendelschwingungen grössere Sicherheit als Gl. (27). Sofern nachweisbar kleinere Schwingwinkel als 90^0 auftreten, sollte dies berücksichtigt werden. Man erhält dann eine grössere Teilfeldlänge l und damit eine kleinere Anzahl Abstandhalter.

Die Teilfeldlänge l ist nach Gl. (27) ausser vom Schwingwinkel α noch vom Teilleiterabstand a und der Seilzugspannung p abhängig. Spezifisch schwere Seile mit hoher Zugspannung vertragen bei konstanten Windkräften eine grössere Teilfeldlänge als leichte Seile mit niedriger Zugspannung. Gl. (28) eignet sich für eine solche Diskussion nicht. Die gegenüber Gl. (27) vorgenommene Vereinfachung entwickelt hier das falsche Bild einer mit wachsendem spezifischen Teilleitergewicht kleiner werdenden Teilfeldlänge.

Für die Seilzugspannung p müsste korrekterweise die durch die Windlast erhöhte Zugspannung eingesetzt werden. Damit Gl. (28) ihren Charakter als Näherungslösung behält, soll hier auf die etwas umständliche Errechnung der Seilzugspannung bei Wind verzichtet werden. Der Unterschied zwischen normaler und windbelasteter Zugspannung ist in diesem Falle nachweisbar gering.

7. Diskussion der Teilfeldlängen-Gleichung anhand von Beispielen

Ein Al/St-Seil 240/40 mm² hat bei 350 m Feldlänge und 8,25 kp/mm² Ausgangszugspannung eine Mittelzugspannung ($+10^0$) von 4,56 kp/mm². In einem so gespannten waagerechten Zweier-Bündel mit 40 cm Teilleiterabstand ergibt sich mit Gl. (28) für die Teilfeldlänge:

$$l \leqq 2\sqrt{40\,\frac{456}{3{,}45\cdot 10^{-3}}} \leqq 46\ \text{m}$$

Dieser Wert stimmt mit der im deutschen 380-kV-Netz zugelassenen maximalen Teilfeldlänge von 45 m gut überein.

Von Interesse ist jetzt noch die Änderung der Teilfeldlänge mit der Zugspannung.

Die Regelspannweite beträgt im deutschen 380-kV-Netz 350 m [12]. Bei einer Ausgangszugspannung von $p = 8{,}25$ kp/mm² (75 % von 11 kp/mm²) erhält man in Abhängigkeit von der Seiltemperatur t_S den in Fig. 12 dargestellten Kurvenverlauf. Auf der gleichen Fig. 12 ist die Teilfeldlänge l als Funktion der Seiltemperatur t_S aufgetragen. Die Änderung der Teilfeldlänge l mit der Seilzugspannung p macht sich erwartungsgemäss nur geringfügig bemerkbar, da p in Gl. (28) unter der Wurzel steht. Es erscheint vernünftig und technisch vertretbar, zur Festlegung der Teilfeldlänge auf die Mittelzugspannung zurückzugreifen. Selbst bei höheren Leiterseil-

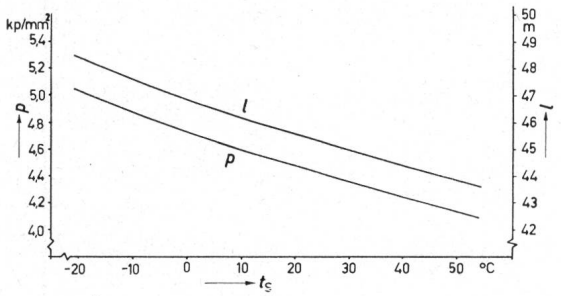


Fig. 12

Seilzugspannung p und Teilfeldlänge l als Funktion der Seiltemperatur t_S einer 220- und 380-kV-Bündelleitung

Seil: Al/St 240/40; Seilzugspannung $P_{max} = 8{,}25$ kp/mm² bei —5 °C

temperaturen im Sommer wird bei aufkommendem Wind oder Sturm ein starker Temperaturfall eintreten. Die Mittelzugspannung ($+10^0$) liegt im deutschen 380-kV-Netz mit Al/St-Seilen 240/40 mm², bei 350 m Spannweite, bei rund 4,6 kp/mm². Bezogen auf die früher übliche Nennlast sind dies 16 %.

In den USA rechnet man in der sog. «Medium area» (Zone mit mittleren Umweltbedingungen, Eis, Wind usw.) mit einer EDS (15,6 °C) von 20...25 % der Seilbruchlast [13]. Bezieht man diese Angaben auf das bekannte canadische Seil «Condor», mit einem Durchmesser von 27,72 mm, Querschnitt = 402/52 mm², Seilbruchlast 12950 kp, so erhält man für die Seilzugspannung p:

$$p = \frac{0{,}225 \cdot 12\,950}{454} = 6{,}42 \text{ kp/mm}^2$$

Hier wurde mit einer mittleren EDS von 22,5 % gerechnet. Wird dieses Seil in einem waagerechten Zweier-Bündel mit dem in den USA üblichen Teilleiterabstand von etwa 45 cm verlegt, so erhält man für die Teilfeldlänge:

$$l = 2\sqrt{45 \frac{642}{3{,}31 \cdot 10^{-3}}} = 59 \text{ m}$$

In der «Light area» sind Arbeitszugspannungen von 30...40 % der Seilbruchlast zugelassen [13]. Mit 35 % beträgt dann die Zugspannung im Seil «Condor»:

$$p = \frac{0{,}35 \cdot 12\,950}{454} = 10 \text{ kp/mm}^2$$

Mit diesem Wert wird die Teilfeldlänge l:

$$l = 2\sqrt{45 \frac{1000}{3{,}31 \cdot 10^{-3}}} = 74 \text{ m}$$

Das Ergebnis stimmt auffallend gut mit dem in den USA als maximale Teilfeldlänge empfohlenen Wert von 250 Fuss = 76 m überein.

Die Beispiele zeigen zunächst eine brauchbare Übereinstimmung zwischen Theorie und Praxis. Dies gilt sowohl für deutsche als auch für amerikanische Verhältnisse. Gl. (28) bietet demnach einen zuverlässigen Anhaltspunkt zur Ermittlung der Teilfeldlänge.

Mit den Gl. (25) und (27) liesse sich durch entsprechende Wahl des Verhältnisses W/G sicher auch eine gewisse Übereinstimmung zwischen den anderen Praxiswerten und der Theorie herstellen. Ein solcher Nachweis enthält aber zu viel Spekulation und wird deshalb nicht geführt. Sicher ist, dass Leitungen in hügeligem Gelände und ausserhalb der Hauptwindrichtung in der Teilfeldlänge unproblematisch sind und deshalb grosszügig bemessen werden können. Anders liegen die Verhältnisse bei Leitungen im flachen Land, an Küsten und bei Leitungsrichtung quer zur Hauptwindrichtung. Hier ist mit heftiger Windbeaufschlagung zu rechnen.

Unter gleichen oder ähnlichen Trassenbedingungen kann Gl. (28) auch irritierend grosse Unterschiede aufklären. Der Vergleich typischer deutscher und amerikanischer Leitungen beweist dies. Die bisher scheinbaren Unstimmigkeiten in der Teilfeldlänge sind zum grossen Teil auf unterschiedlichen Teilleiterabstand und Zugspannung zurückzuführen.

Gegen das gefürchtete Zusammenschlagen der Teilleiter bei Wind bieten beide Leitungsbauarten die gleiche Sicherheit. Nachdem das Problem «Teilfeldlänge» sowohl in Deutschland als auch in amerikanischen Versuchsstationen teilweise über Jahre untersucht wurde, überrascht das Ergebnis nicht.

8. Zusammenfassung

Die Teilleiter einer Bündelleitung schlagen im freien Feld bereits bei niedriger Windgeschwindigkeit zusammen, wenn sie nicht mit Abstandhaltern distanziert werden. Der mechanische Kontakt erfolgt schlagartig und verursacht Seildeformationen. Unter ungünstigen Bedingungen können die Teilleiter durch Stromkräfte aneinanderkleben und dabei gegeneinanderreiben.

Die Analyse von Versuchswerten und Erfahrungen der Praxis ergab im waagerechten Zweier-Bündel unter deutschen Bedingungen eine maximal zulässige Teilfeldlänge von 45 m. In den USA werden maximal 76 m empfohlen.

Die theoretische Betrachtung des windbelasteten Bündelleiters zeigt, dass eine gegenläufige Pendelschwingung der Teilleiter gegeben ist. Unter dieser Voraussetzung wurde für die Teilfeldlänge eine einfache Bedingung gefunden, die ein Zusammenschlagen der Teilleiter verhindert. Danach wächst die zulässige Teilfeldlänge mit der Wurzel aus dem Teilleiterabstand und der Zugspannung. Ein Vergleich zwischen Theorie und Praxis zeigt gute Übereinstimmung.

Die nach Gl. (27) und (28) maximal zulässige Teilfeldlänge gilt für den windbelasteten, schwingenden bzw. pendelnden Bündelleiter. Im Sonderfall des Seiltanzens im gesamten Spannfeld ist ein Zusammenschlagen der Teilleiter trotzdem möglich. Hier treten Bewegungsvorgänge auf, die bei der Ableitung der Gl. (27) und (28) nicht berücksichtigt wurden.

Zur Erhöhung der Bündelstabilität ist es zweckmässig, die maximal zulässige Teilfeldlänge zum Mast hin stufenweise auf etwa 50...60 % des Ausgangswertes (Feldmitte) abzubauen.

Literatur

[1] *C. R. Bond* and *F. A. Denbrock:* Design and tests of 345 kV transmission lines for the Ohio Edison System. Proc. American Power Conference 22(1960), S. 577...590.

[2] *F. Cahen et R. Pelissier:* L'emploi de conducteurs en faisceaux pour l'armement des lignes à très haute tension. Résultats d'essais de la station experimentale à 500 kV de Chevilly. Bull. soc. franç. électr. 6/8(1948), S. 111...160.

[3] *H. Mors* und *W. Leibfried:* Die Bündelleiterversuchsanlage Hornisgrinde. Karlsruhe, Badenwerk AG, o. J.

[4] *R. J. Mather* and *A. R. Hard:* Horizontal bundle spacers. Trans. AIEE, Power Apparatus and Systems 77(1958), S. 823...833.

[5] *A. T. Edwards* and *J. M. Boyd:* Bundle-conductor-spacers design requirement and development of "spacer-vibration damper". Ontario Hydro, research quarterly 16(1964)2, S. 1...12 + 14.

[6] *O. D. Zetterholm:* La ligne de transmission à 380 kV de Harspanget à Hållsberg. Bull. soc. franç. électr. 6/10(1950), S. 268...276.

[7] *K. Pochop:* Die erste 400 kV-Leitung in Polen. Elektrotechniky Obzor 54(1965), S. 490...493, ref. in: Elektrotechnik, Industrie und Betrieb 48(1966), S. 255.

[8] *H. Glöyer* und *T. Vogelsang:* Die 380-kV-Leitung Rommerskirchen-Hoheneck. ETZ-A 79(1958), S. 202...206.

[9] *P. Cathelat:* Das Wasserkraftwerk von El Infiernillo und die 400-kV-Leitung El Infiernillo-Mexiko der Comisión Federal de Electricidad in Mexiko. Techn. Informationsblatt des Franz. Generalkonsulates, Zürich –(1966)7/8, S. 1...7, ref. in: Bull. SEV 58(1967)5, S. 225...226.

[10] *L. Moecks:* Tanzen von Freileitungsseilen. Elektr.-Wirtsch. 65(1966), S. 803...807.

[11] *E. Hübner:* Technische Schwingungslehre in ihren Grundzügen. Berlin/Göttingen/Heidelberg, Springer, 1957.

[12] Die Planung des 380 kV-Netzes in der deutschen Verbundgesellschaft. Heidelberg, deutsche Verbundgesellschaft e. V., 1957.

[13] *E. Fritz:* The effect of tighter conducter tensions on transmission line costs. Trans. AIEE Power Apparatus and Systems 79(1960), S. 513...527.

Adresse des Autors:
L. Möcks, Ingenieur, Richard Bergner, Elektro-Armaturen, D - 8540 Schwabach.