

Abstandsermittlung bei Freileitungskreuzungen

Von Markus Palic, Karlsruhe*)

Der Verfasser stellt ein Berechnungsschema für die Abstandsermittlung bei Freileitungskreuzungen vor, wie sie in der neuen Fassung der DIN VDE 0210 (vom 12. Mai 1985) für Leitungen über 1 kV verlangt wird. Abweichend zu der früheren Vorgehensweise wird bei der künftigen Kreuzungsberechnung das durch Windlast verursachte Ausschwingen sowohl für die über- als auch die unterkreuzende Leitung berücksichtigt und gleichzeitig ein größerer Mindestabstand gefordert.

Allgemeines

Die im Dezember 1985 in Kraft getretene DIN VDE 0210 »Bau von Starkstromfreileitungen mit Nennspannungen über 1 kV« [1] in Verbindung mit der erst jüngst in Kraft getretenen Änderung [8] regelt den Nachweis für Kreuzungsabstände zwischen Freileitungen teilweise neu. Während in der vorangegangenen Fassung die Abstandsbestimmung außer bei ruhenden Leitern bei 40 bzw. 60 °C und -5 °C mit bzw. ohne Zusatzlast für die sich kreuzenden Leitungen das Ausschwingen der unteren durch Windlast gegen eine überkreuzende und ruhende Leitung bei jeweils unterschiedlichen Abstandsvorgaben vorsah, berücksichtigt die neue Fassung neben einheitlichen Abständen das resultierende Ausschwingen der jeweils anderen Leitung.

Abstandsnachweis

Bei der künftigen Abstandsermittlung werden folgende Fälle zu untersuchen sein [1; 2; 8]:

Fall 1

für die überkreuzende Leitung: größter Durchhang der Leiter (bei 40 bis 80 °C);
für die unterkreuzende Leitung: größter Durchhang der Leiter (bei 40 °C).

Fall 2

für die überkreuzende Leitung: Durchhang bei -5 °C und 50prozentiger ungleicher Zusatzlast der Felder;
für die unterkreuzende Leitung: Durchhang bei -5 °C ohne Zusatzlast (jeweils im Ruhezustand).

Fall 3

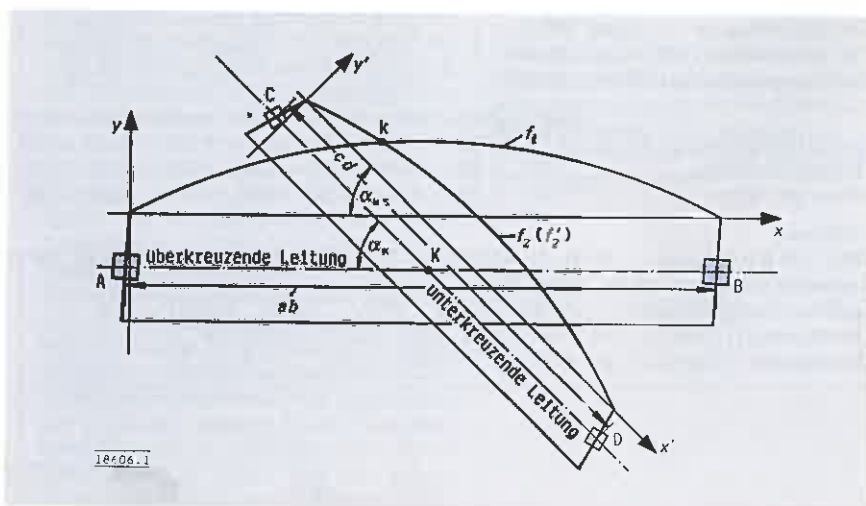
für beide Leitungen: Ausschwingen der Leiter bei 40 °C und Windlast. Windlast rechtwinklig auf eine Leitung, entweder die unterkreuzende oder die überkreuzende. Gleichzeitig Windlast auf die andere Leitung, jedoch mit dem Quadrat des Cosinus des Einfallswinkels (Winkel zwischen Lot auf die Leitung und Windrichtung) multipliziert. Der Staudruck ist dabei um bis zu 40% vermindert anzunehmen.

Für alle drei Fälle gilt bei Leitungen mit Betriebsspannungen zwischen 1 und 123 kV ein Mindestabstand von 2 m. Leitungen mit höheren Betriebsspannungen erhalten Abstandsvergrößerungen von 0,75 m (bei 245 kV) und 1,8 m (bei 420 kV)!

Das Nachweisverfahren für den Mindestabstand bei Fall 1 und Fall 2 ändert sich gegenüber der vorangegangenen Fassung nicht. Durch den Hinweis auf die Annahme höherer Leiterseiltemperaturen als 40 °C für die überkreuzende Leitung wird nunmehr einer höheren Belastbarkeit der Leitungen, wie sie in [9] zugelassen sind, Rechnung getragen. Eine Regelung, die bei vielen Unternehmen bereits vor Inkrafttreten der neuen Vorschrift Anwendung fand.

Abweichungen zu der bisherigen Praxis bringt der Fall 3. Hier soll das Ausschwingen beider Leitungen berücksichtigt und derjenige Abstand nachgewiesen

Bild 1. Kreuzungspunkt von zwei ausgeschwungenen Seilen in der Projektion auf eine horizontale Ebene



werden, der sich dabei als kleinstmöglicher ergibt. Durch diese prinzipielle Verbesserung wurden die Vorbehalte gegen die alte Fassung ausgeräumt. Sie verlangt nämlich den Abstandsnachweis bei ruhender überkreuzender und gleichzeitig voll ausgeschwungener unterkreuzender Leitung. Diese Betrachtung traf aber nur für den Sonderfall einer rechtwinkligen Leitungskreuzung physikalisch korrekt zu. In allen anderen Fällen, besonders bei kleinen Kreuzungswinkeln, wurden auch bei Beachtung der vielen Unwägbarkeiten in der Praxis, die eine großzügige Vorgehensweise gebieten, unnötige Reserven abverlangt.

Kreuzungspunkte von zwei ausgeschwungenen Leiterseilen

Während die Fälle 1 und 2 rechnerisch wie gewohnt gehandhabt werden können, ist für den Fall 3 die Ermittlung des Kreuzungspunktes der zwei ausgeschwungenen Leitungen neu hinzugekommen. Bei dem hier vorgestellten Lösungsverfahren wird der Abstand einer guten Nachvollziehbarkeit wegen in zwei Stufen berechnet. Zunächst wird der Kreuzungspunkt ermittelt, der auf eine horizontale Ebene projizierten ausgeschwungenen Leiterseile. Die Definition eines auf die überkreuzende Leitung und das jeweils betrachtete Leiterseil bezogenen örtlichen Koordinatensystems erlaubt es, die beiden als Parabeln dargestellten Funktionen mathematisch zum Schnitt zu bringen (Bild 1). Hierzu wird die Parabelgleichung der ausgeschwungenen unterkreuzenden Leitung in das Koordinatensystem der überkreuzenden Leitung transformiert; aus $f_2 = f(x', y')$ wird $f_2' = f(x, y)$. Die zur Findung des Schnittpunktes gleichgesetzten Funktionen $f_1 = f_2'$ führen zu einer Schnittpunktgleichung 4. Grades, die sinnvollerweise iterativ gelöst wird. Da die meisten

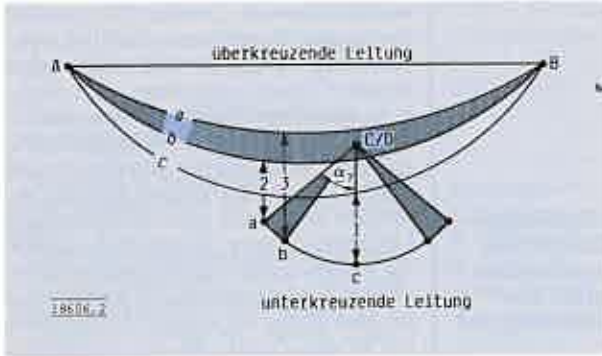


Bild 2. Kreuzungsabstände

- a Ausgeschwungen unter voller Windlast
- b um 40% des Staudrucks reduziert ausgeschwungenen
- c Durchhang im Ruhezustand

Tafel 1. Kreuzungsattribute der 110- und 20-kV-Leitungen in Beispiel 1 bei $\alpha_K = 60$ gon

	überkreuzende Leitung		unterkreuzende Leitung		überkreuzende Leitung		unterkreuzende Leitung	
	links (A)	rechts (B)	oben (C)	unten (D)	links	rechts	links	rechts
Mastdaten								
MastNr.-MastNr.	1	2	11	12				
Traversenwinkel gon	100,0	80,0	100,0	100,0				
Traversenhöhe üEOK m	21,40	23,40	12,00	18,00				
Aufhängepunktshöhe üNN m	105,13	110,71	95,03	94,50				
Traversenausladung m	6,30	6,30	8,40	8,40	2,00	2,00	2,00	2,00
Hängekettenlänge m	2,00	2,00	0,00	0,00	0,80	0,80	0,80	0,80
Schwingenlänge m	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Feld- und Kreuzlänge m	A-B: 360,00	A-K: 200,00	C-D: 130,00	C-K: 75,00				
Trassen-Kreuzungswinkel gon	60,00							
Seilbezeichnung/Baujahr	Al/St 256/35 1989		Al/St 95/15 1989					
Durchhänge (Überkr.) m	+40: 12,40	+60: 13,06	-5 UZ: 13,06					
Durchhänge (Unterkr.) m	+40: 2,57	+40: 2,57	-5: 2,57					

Tafel 2. Kreuzungsattribute der 380- und 110-kV-Leitungen in Beispiel 2 bei $\alpha_K = 70$ gon

	überkreuzende Leitung		unterkreuzende Leitung		überkreuzende Leitung		unterkreuzende Leitung	
	links (A)	rechts (B)	oben (C)	unten (D)	links	rechts	links	rechts
Mastdaten								
MastNr.-MastNr.	1	2	11	12				
Traversenwinkel gon	100,0	80,0	100,0	100,0				
Traversenhöhe üEOK m	28,50	25,00	19,60	19,60				
Aufhängepunktshöhe üNN m	94,29	76,65	62,05	82,88				
Traversenausladung m	14,25	14,25	14,25	14,25	6,30	6,30	6,30	6,30
Hängekettenlänge m	5,00	5,00	0,00	0,00	2,00	2,00	2,00	2,00
Schwingenlänge m	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Feld- und Kreuzlänge m	A-B: 410,00	A-K: 200,00	C-D: 340,00	C-K: 160,00				
Trassen-Kreuzungswinkel gon	70,00							
Seilbezeichnung/Baujahr	Al/St 256/35 1989		Al/St 185/30 1989					
Durchhänge (Überkr.) m	+40: 16,75	+40: 16,75	-5 UZ: 16,75					
Durchhänge (Unterkr.) m	+40: 12,75	+40: 12,75	-5: 11,32					

einfacheren Iterationsverfahren je nach Wahl des Startwertes u. U. nicht die interessierenden Nullstellen finden, wurden mehrere Algorithmen auf ihre Eignung hin geprüft. Als anwendbar erwies sich für diesen Anwendungsfall das Iterationsverfahren nach Laguerre [3]. Es hat die in Gl. (1) gezeigte Form.

$$X_{k,n+1} = X_{k,n} - \frac{4 \cdot p(X_{k,n})}{p'(X_{k,n}) \pm \sqrt{H(X_{k,n})}} \quad (1)$$

wobei

$$H(X_{k,n}) = 9 \cdot p'(X_{k,n})^2 - 12 \cdot p(X_{k,n}) \cdot p''(X_{k,n}) \quad (2)$$

ist.

Das Lösungsverfahren konvergiert sehr schnell und erlaubt eine gezielte Richtungswahl über das Vorzeichen im Nenner bei der Nullstellensuche zwischen den Nullstellen (z.B. $X_{k,n} = 0$ und $X_{k,n} = ab$), so daß der Kreuzungspunkt nach wenigen Durchläufen feststeht. Ist dieser ermittelt, so läßt sich der Abstand anhand der Höhenverhältnisse der Aufhängepunkte und der Durchhänge in gewohnter Weise berechnen.

Randbedingungen für die Abstandsermittlung

Ähnlich der Abstandsermittlung zwischen Seilen auf einem Gestänge untereinander [6] ist nun beim Ausschwingen der sich kreuzenden Leiterseile die Rückeileitung des einen gegenüber dem anderen zu berücksichtigen. Eine Forderung, die im Hinblick darauf, daß bei sehr kleinen Kreuzungswinkeln die Verhältnisse denen bei Seilen auf gleichem Gestänge sehr ähneln, durchaus plausibel erscheint.

Damit sind bei der konkreten Abstandsermittlung zwischen Seilen sich kreuzender Leitungen folgende Zustände zu unterscheiden und zu untersuchen (Bild 2):

- 1 Abstandsermittlung nach Fall 1 und Fall 2,
- 2 Abstandsermittlung bei einer voll ausgeschwungenen unterkreuzenden und einer mit 40% reduziertem Staudruck ausgeschwungenen überkreuzenden Leitung,
- 3 Abstandsermittlung bei einer voll ausgeschwungenen überkreuzenden und einer mit 40% reduziertem Staudruck ausgeschwungenen unterkreuzenden Leitung.

Da die volle Windlast abwechselnd auf die unter- und überkreuzende Leitung anzunehmen ist, ergibt sich bei der jeweils resultierend ausgeschwungenen eine dem Einfallswinkel entsprechend verringerte Windlast. Als Ausschwingwinkel für die Leiterseile im voll und reduziert ausgeschwungenen Zustand unter Berücksichtigung des Windeinfallswinkels (Bild 3) ergeben sich nach [1] in Verbindung mit [7] folgende Beziehungen (hier stellvertretend für alle 4 Kreuzungspunkte am Kreuzungspunkt k_1 vorgestellt):

1. Betrachtung bei

$$\alpha_1 = \arctan \frac{W_{s1}}{G_{s1}} \text{ und } \alpha_2 = \arctan \left(\frac{W_{s2}}{G_{s2}} \cdot \cos^2 \alpha_w \right)$$

2. Betrachtung bei

$$\alpha_1 = \arctan \frac{(0,6 \cdot W_{s1})}{G_{s1}} \text{ und } \alpha_2 = \arctan \left(\frac{W_{s2}}{G_{s2}} \cdot \cos^2 \alpha_w \right)$$

3. Betrachtung bei

$$\alpha_1 = \arctan \frac{W_{s1}}{G_{s1}} \text{ und } \alpha_2 = \arctan \left(\frac{0,6 \cdot W_{s2}}{G_{s2}} \cdot \cos^2 \alpha_w \right)$$

Konsequent muß die Abstandsuntersuchung für alle nach Bild 3 denkbaren Kreuzungspunkte k_1 bis k_4 durchgeführt werden, da von vornherein nur schwer erkennbar ist, bei welchem der vier Kreuzungspunkte der kleinste Abstand entsteht. Auch der scheinbar unkritische Fall der voll ausgeschwungenen überkreuzenden und reduziert ausgeschwungenen unterkreuzenden Leitung kann bei entsprechender Anordnung der Seile zueinander maßgebend werden und sollte deshalb mit untersucht werden.

Die gegenüber der alten Fassung der Bestimmung etwas umfangreichere Kreuzungsberechnung läßt sich, ebenso wie die mathematisch genaue Ermittlung des Kreuzungspunktes, durch den Einsatz eines in den meisten Unternehmen bereits vorhandenen Personalcomputers (PC) in Verbindung mit geeigneter Software sowie einem entsprechenden Programm, wie es zum Beispiel in [4] und [5] beschrieben wird, sehr einfach und schnell durchführen.

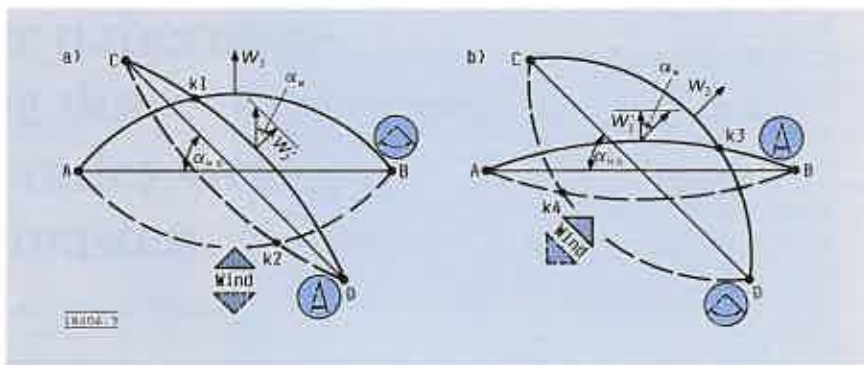


Bild 3. Kreuzungspunkte

- a) Kreuzungspunkte bei der Windrichtung senkrecht auf die überkreuzende Leitung (A - B)
 b) Kreuzungspunkte bei der Windrichtung senkrecht auf die unterkreuzende Leitung (C - D)

fel 1). Das zweite Beispiel soll die Unterschiede in einer durch große Höhenunterschiede der Aufhängepunkte gekennzeichneten extremen Situation zwischen einer 380- und 110-kV-Leitung zeigen (Tafel 2). In beiden Fällen werden die für die Leitung üblichen Spannweiten und Zugspannungen gewählt. Da erwartet werden muß, daß die Einhaltung des vorgegebenen Mindestabstandes im ausgeschwungenen Zustand nach den unterschiedlichen Verfahren zu jeweils anderen Abständen der ruhenden Leiterseile führt – besonders bei Veränderung des Kreuzungswinkels – soll die prozentuale Änderung der Abstände im Ruhezustand, bezogen auf diejenigen nach alter Vorschrift, für die beide Beispiele dokumentiert werden. Die Abstandsunterschiede in Ruhe sind ein Maß für die Änderungen des Aufhängepunktes – bzw. Masthöhen der überkreuzenden Leitung.

In Bild 4a und 4b sind die Ergebnisse jeweils in einem Diagramm dargestellt. Es ist deutlich erkennbar, daß der Vorteil, der durch das Ausschwingen beider Leitungen entsteht (indem sich z. B. die überkreuzende Leitung durch das Mittausschwingen nach oben entfernt) durch die Erhöhung des geforderten Mindestabstandes von 0,74 m auf 2 m gänzlich aufgezehrt wird.

Vergleich der unterschiedlichen Berechnungsverfahren

Streng genommen müßte die Bestimmung des kleinstmöglichen Abstandes bei der Betrachtung eines um einen Vollkreis sequentiell rotierenden Windvektors (Windrose) im Kreuzungsbereich stattfinden. Es ist denkbar, daß der kleinste Abstand bei einer Windrichtung, die auf keine der beiden Leitungen senkrecht gerichtet ist, zustande kommt; d. h., während beide Leitungen durch den jeweiligen Windeinfallswinkel reduziert ausgelenkt werden. Diese Methode ist auch unter Einsatz moderner EDV-Anlagen relativ zeitraubend und soll hier lediglich zur Abschätzung der Abweichungen zu dem in der Vorschrift geforderten Nachweisverfahren herangezogen werden.

Um beurteilen zu können, welche Änderungen in bezug auf die Mindestabstände die Vorgehensweise nach neuer Vorschrift gegenüber derjenigen entsprechend der vorangegangenen Fassung mit sich bringt und inwieweit diese von einer physikalisch korrekten Betrachtung abweichen, sollen die unterschiedlichen Berechnungsverfahren auf zwei ausgewählte Beispiele angewandt und untereinander verglichen werden. Beim ersten Beispiel handelt es sich um eine durchschnittliche, in dieser Art mit großer Häufigkeit vorkommende Kreuzung zwischen einer 110- und 20-kV-Leitung (Ta-

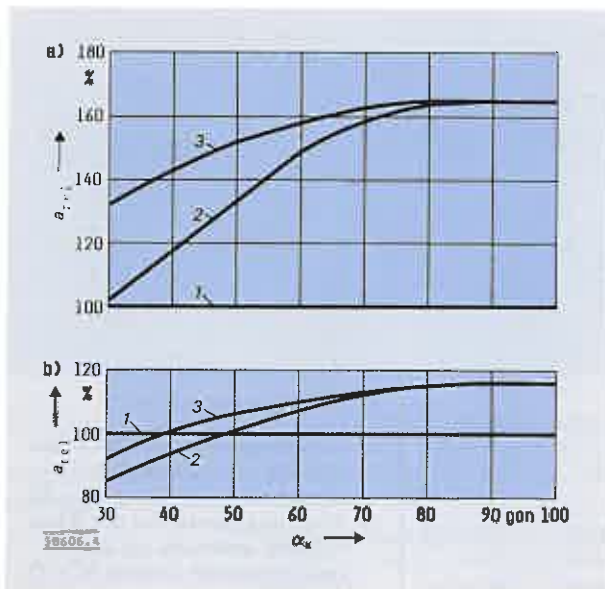


Bild 4. Relative Abstände

Die nach exakter Methode und die nach den Vorgaben der neuen Bestimmung ermittelten Werte weisen zum Teil deutliche Unterschiede auf. Die Unterschiede sind aber tolerierbar, da sie den Sicherheitsstandard der alten Bestimmung erst bei sehr kleinen Kreuzungswinkeln unterlaufen. Bei solchen Kreuzungswinkeln sind in der Regel die stationären Abstandsbedingungen nach Fall 1 und Fall 2 durchschlagend. Selbst wenn man davon ausgeht, daß bei ungünstigen Anordnungen der kreuzenden Leitungen zueinander unter Umständen ein Abstandsmanko entsteht, bleiben bei der Forderung nach 2 m Mindestabstand noch genügend Reserven.

Zusammenfassung

Das vorgestellte Verfahren der Abstandsbestimmung bei Freileitungskreuzungen erlaubt eine exakte Problemlösung. Es genügt den Anforderungen der DIN VDE 0210 vom 12. Mai 1985 und ist damit universell anwendbar. Durch den gegenüber dem früheren Verfahren etwas größeren Aufwand beim Abstandsnachweis empfiehlt sich die Umsetzung des Berechnungsverfahrens in ein Rechenprogramm (z. B. auf einem Personalcomputer). Die Handhabung der Berechnung läßt sich dadurch sehr anwenderfreundlich, bequem und schnell gestalten.

- a) relative Abstände a_{rel} im Ruhezustand und 40°C für beide Leitungen des Beispiels 1 als Funktion des Kreuzungswinkels α_K
- 1 nach VDE 0210 vom 5. 69 ($\bar{a}_{min} = 1,93 \text{ m} \triangleq 100\%$)
 - 2 nach DIN/VDE 0210 vom 12. 85
 - 3 nach dem Verfahren des rot. Windvektors
- b) relative Abstände a_{rel} im Ruhezustand und 40°C für beide Leitungen des Beispiels 2 als Funktion des Kreuzungswinkels α_K
- 1 nach VDE 0210 vom 5. 69 ($\bar{a}_{min} = 8,42 \text{ m} \triangleq 100\%$)
 - 2 nach DIN/VDE 0210 vom 12. 85
 - 3 nach dem Verfahren des rot. Windvektors

Schrifttum

- [1] DIN/VDE 0210: Bau von Starkstrom-Freileitungen mit Nennspannungen über 1 kV. VDE-Verlag, Berlin Dez. 1985.
- [2] Fischer, P.; Kießling, F.: Freileitungen. Springer-Verlag, Berlin 1989.
- [3] Heizinger u. a.: Praxis nichtlinearer Gleichungen. Hanser-Verlag, München 1985.
- [4] Palic, M.; Keil, M.: Programm zur Berechnung von Freileitungskreuzungen (GW-Basic). Badenwerk AG, Karlsruhe 1989.
- [5] Kolb, H. J.: Universal-Kreuzungsrechnung. Selbstverlag, Waldbronn 1988.
- [6] Palic, M.: Programmierte Abstandsermittlung zwischen Freileitungsseilen. Elektrizitätswirtschaft 81 (1982), S. 289–293.
- [7] DIN/IEC 11(CO)23 (Entwurf) Lasten für Freileitungsmaste, Teil 3: Gleichzeitige Wind- und Eislasten. Beuth-Verlag, Berlin Jan. 1985.

- [8] DIN/VDE 0210 A1: Bau von Starkstrom-Freileitungen mit Nennspannungen über 1 kV. Beratungsunterlagen Juni 1989.
- [9] DIN 48204: Freileitungsseile – Aluminium-Stahlseile – Beuth-Verlag, Berlin April 1984.

Zusammenstellung der verwendeten Formelzeichen

a_{min}	kleinster Kreuzungsabstand bei ruhenden Seilen	m
f_1	Parabelfunktion überkreuzendes Seil	–
f_2	Parabelfunktion unterkreuzendes Seil	–
f_2'	Parabelfunktion des unterkreuzenden Seiles im X, Y-Koordinatensystem	–
G_{s1}	längenbezogenes Seilgewicht von Seil 1	N/m
G_{s2}	längenbezogenes Seilgewicht von Seil 2	N/m
k	Kreuzungspunkt der ausgeschwungenen Seile	–
K	Trassenkreuzungspunkt	–
$p(X_{kn})$	Funktionswert bei $X_{k,n}$	m
$p'(X_{k,n})$	Wert der 1. Ableitung	–
$p''(X_{k,n})$	Wert der 2. Ableitung	–
W_{s1}	längenbezogene Windlast auf Seil 1	N/m
W_{s2}	längenbezogene Windlast auf Seil 2	N/m
X, Y	örtliches Koordinatensystem, bezogen auf das überkreuzende Leiterseil	m
X', Y'	örtliches Koordinatensystem, bezogen auf das unterkreuzende Leiterseil	m
X_k	X-Wert des Seilkreuzungspunktes	m
$X_{k,n}$	aktueller Wert X_k bei der Iteration	m
$X_{k,n+1}$	nach einen Iterationsdurchlauf gefundener, verbesserter Wert von X_k	m
α_1	Ausschwingwinkel von Seil 1	gon
α_2	Ausschwingwinkel von Seil 2	gon
α_K	Trassenkreuzungswinkel	gon
α_{ks}	Seilkreuzungswinkel	gon
α_w	Windeinfallswinkel (Winkel zwischen Windrichtung und Lot auf Seil)	gon