Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association suisse des électriciens, de l'Association des entreprises électriques suisses

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen

Band: 76 (1985)

Heft: 2

Artikel: Auslegung von Freileitungen

Autor: Reichert, K.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-904544

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: 09.12.2025

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

Auslegung von Freileitungen

K. Reichert

Mit Arbeitsplatzcomputern ist es möglich, die Auslegung von Freileitungen interaktiv am Bildschirm durchzuführen und dabei gleichzeitig den gestiegenen Anforderungen an solche Berechnungen gerecht zu werden. Ausgehend von den Grundgleichungen über Geometrie, mechanische Beanspruchung und Zustandsänderungen beschreibt der Beitrag das Vorgehen bei der Auslegung von Freileitungen bei gegebener maximaler Seilzugkraft, bei der Ermittlung des Verhaltens von Freileitungen bei Zustandsänderungen sowie die Berechnung des Spannens einer Freileitung mit vorgegebener Horizontalkraft.

Grâce aux microordinateurs, il est possible de réaliser à l'écran, de manière interactive, le dimensionnement de lignes aériennes et, en même temps, de répondre aux exigences accrues que demandent de tels calculs. Partant d'équations de base sur la géométrie, les contraintes mécaniques et les changements d'état, l'article décrit le procédé pour le dimensionnement de lignes aériennes avec une force de traction des câbles maximale donnée, pour la détermination du comportement de lignes aériennes en cas de changement d'état ainsi que pour le calcul de la tension d'une ligne aérienne avec une force horizontale donnée.

Adresse des Autors
Prof. *Konrad Reichert*, Institut für Elektrische Maschinen, ETH Zürich, 8092 Zürich

1. Einleitung

Die Problemstellungen bei der Auslegung von Hochspannungsfreileitungen werden bedingt durch die Vergrösserung der Vermaschung bzw. der Leitungsdichte, der Betriebsspannung, der Spannweiten usw. und vor allem durch die Verschärfung der Umweltrandbedingungen immer anspruchsvoller. Mit Hinsicht auf die Sicherheit des Betriebes und der Umwelt müssen sehr hohe Anforderungen an die Genauigkeit von Auslegungsberechnungen (Seilspannung, Seildurchhang, Mastbeanspruchung usw.) gestellt werden [1, 2]. Näherungsverfahren sind nur noch anwendbar, wenn bestimmte Voraussetzungen erfüllt sind oder grosse Risiken in Kauf genommen werden.

Schon vor längerer Zeit wurden für die exakte Analyse komplexer Mast- und Seilanordnungen Programme entwickelt [3], die auf Grossrechenanlagen abgearbeitet werden. Für Taschenrechner wurden Programme aufgestellt, mit denen Standardfälle der Seildurchhangsberechnung behandelt werden können [4].

Im folgenden werden Aufgabenstellungen der Seildurchhangsberechnung betrachtet, die interaktiv mit Hilfe von Arbeitsplatzcomputern gelöst werden.

2. Aufgabenstellung

Eine Freileitung ist nach der «Starkstromverordnung», Art. 86–89, so zu bemessen, dass:

- bei der tiefsten Ortstemperatur, ohne Zusatzlast und Wind, oder bei einer gleichmässig verteilten Zusatzlast (2 kg/m) und einer Temperatur von 0 °C, die max. Zugbeanspruchung kleiner als ⅔ der Zerreissfestigkeit ist,
- der Bodenabstand bei einer Temperatur von 0 °C und einer gleichmässig verteilten Zusatzlast Minimalwerte nicht unterschreitet.

Weiterhin von Interesse sind

- die beim Verlegen der Seile einzustellenden Seilzugkräfte und die notwendigen Seillängen,
- der Einfluss verschiedener Feldlängen, Temperaturen, Seilarten, Höhenunterschiede, lokaler Zusatzlasten auf die Seilbeanspruchung und den Durchhang,
- der Bodenabstand bei verschiedenen Belastungen,
- der Einfluss von lokalen Zusatzlasten, Störungen usw.

Bei der Aufstellung des Berechnungsverfahrens werden, entsprechend den praktischen Gegebenheiten, die folgenden Annahmen gemacht:

- Das Seil ist homogen, vollkommen durchbiegbar und vollkommen elastisch. Es treten im Seil nur Zugkräfte auf.
- Zusatzlasten sind gleichmässig verteilt.
- Längenausdehnungskoeffizient und Elastizitätsmodul sind konstant.

3. Grundgleichungen

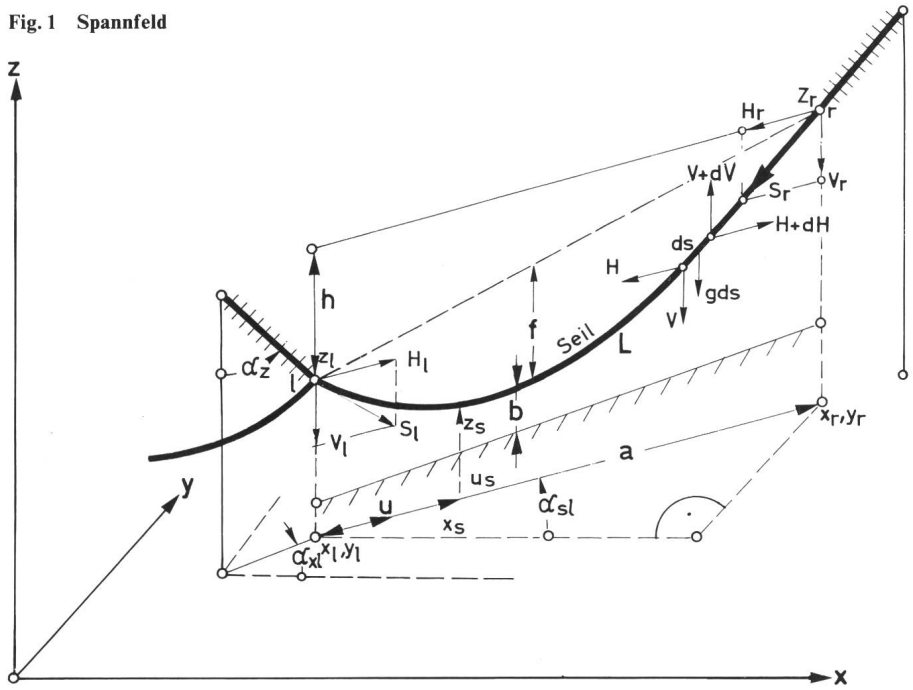
Bei der Aufstellung der Grundgleichungen geht man zweckmässigerweise von einem Grundmodell, einem Spannfeld mit homogenem Seil, aus. Darauf aufbauend können dann die Gleichungen für ein Spannfeld mit Abspannisolation bzw. für mehrere gekoppelte Spannfelder mit Hänge- und Abspannisolatoren abgeleitet werden.

3.1 Grundgleichungen für ein Spannfeld

Ein Spannfeld ist gekennzeichnet durch die folgenden Grössen (vgl. Fig. 1):

- Spannweite $a = \sqrt{(x_r - x_l)^2 + (y_r - y_l)^2}$
- Höhendifferenz $h = z_r - z_l$ zwischen den Aufhängepunkten l und r,
- Lagewinkel $\alpha_s = \arcsin[(y_r - y_l)/a]$,
- Seillänge L,

Fig. 1 Spannfeld



- Durchhang f gegenüber der direkten Verbindung der Aufhängepunkte bzw. Abstand b vom Boden,
- längenbezogene Seilgewichtskraft g bzw. das spezifische Seilgewicht γ, wobei $g = \gamma \cdot q$ ist, wenn q der Seilquerschnitt ist. In g bzw. γ kann auch die Zusatzlast enthalten sein,
- Horizontalzugkraft H bzw. Horizontalzugspannung $\sigma_H = H/q$,
- Vertikalzugkraft V bzw. Vertikalzugspannung $\sigma_V = V/q$,
- Seilzugkraft $S = \sqrt{H^2 + V^2}$ bzw. Seilzugspannung $\sigma = S/q$,
- Temperatur t des Seils,
- Wärmedehnungszahl ε und Elastizitätsmodul E des Seilwerkstoffes.

Die Berechnung setzt sich aus den nachfolgend behandelten Komponenten zusammen.

● *Geometrie*

Die Geometrie des zwischen den Punkten *l* und r aufgehängten Seils ergibt sich aus dem Gleichgewicht der Vertikal- und Horizontalkräfte in einem Seilelement ds:

$$H - H - dH = 0;$$

$$V + g \cdot ds - V - dV = 0$$

Daraus folgt, dass die Horizontalkraft H konstant und die Vertikalkraft V ortsabhängig ist. Mit $V/H = dz/du$, d.h. $dV/du = H \cdot d^2z/du^2$ und $ds/du = \sqrt{1 + (dz/du)^2}$, erhält man aus $dV = g \cdot ds$ die Differentialgleichung der Kettenlinie:

$$\frac{d^2z}{du^2} = \frac{g}{H} \sqrt{1 + \left(\frac{dz}{du}\right)^2}$$

deren Lösung:

$$z = c \cosh \frac{u - u_s}{c} + z_s - c \qquad (1)$$

die Geometrie der Seilkurve beschreibt. Dabei ist $c = H/g$; u_s und z_s sind die Koordinaten des Scheitelpunktes, die abhängig von H, g, a, z_l und z_r sind.

x_s und z_s können mit Hilfe der Seillänge L ermittelt werden. Wegen $ds = c \cdot dV/H = c\, d(dz/du)$ lässt sich für die Seillänge L die Beziehung

$$L = c \left[\sinh \frac{a - u_s}{c} - \sinh \frac{u_s}{c} \right]$$

ableiten.

Mit der Höhe h

$$h = c \left[\cosh \frac{a - x_s}{c} - \cosh \frac{u_s}{c} \right]$$

wird

$$L = \sqrt{h^2 + \left(2c \sinh \frac{a}{2c}\right)^2}$$

$$u_s = \frac{1}{2} \left(a + c \ln \frac{L - h}{1 + h} \right) \qquad (2)$$

$$z_s = z_l + \frac{h}{2} + c - \frac{L}{2} \sqrt{1 + \frac{4c^2}{L^2 - h^2}}$$

Damit ist die Seilkurve beschrieben. Für jeden Punkt (u, z) des Seiles kann der Durchhang f bzw. der Bodenabstand b ermittelt werden. Bei der numerischen Auswertung ersetzt man zweckmässigerweise $\cosh\varphi$ durch $[\exp\varphi + \exp(-\varphi)]/2$ usw.

● *Mechanische Beanspruchung*

Die mechanische Beanspruchung des Seiles ist am höher gelegenen Aufhängepunkt am grössten. Im Scheitelpunkt wirkt nur die Horizontalzugkraft H.

Die Seilzugkraft S bzw. die Zugspannung $\sigma = S/q$ setzt sich aus der Horizontal- und der Vertikalzugkraft zusammen:

$$S = \sqrt{H^2 + V^2}$$

mit

$$V = H \cdot \frac{dz}{du} \quad \text{wird}$$

$$V = H \sinh \frac{u - u_s}{c}$$

d.h.

$$S = H \cosh \frac{u - u_s}{c} = H + g(z - z_s) \qquad (3)$$

Damit erhält man:

$$\left.\begin{aligned} V_l &= H \sinh \frac{u_s}{c}; \quad H_l = H \\ V_r &= H \sinh \frac{a - u_s}{c}; \quad H_r = -H \\ S_l &= H + g(z_l - z_s) \\ S_r &= H + g(z_r - z_s) \end{aligned}\right\} \qquad (4)$$

● *Zustandsänderung*

Bei einer *Änderung des Zustandes*, d.h. bei einer Änderung der Temperatur oder beim Auftreten von Zusatzlasten, ändert sich die Seillänge L, der Durchhang und die Seilzugkraft S bzw. Spannung σ. Beim Spannen des Seiles muss die Seilzugkraft S so eingestellt werden, dass im Auslegungszustand (0 °C und Zusatzlast) keine unzulässigen Beanspruchungen auftreten.

Beim Übergang vom Zustand 1 mit der Seiltemperatur t_1 und der Seilgewichtskraft g_1 in den Zustand 2 mit der Temperatur t_2 und der Seilgewichtskraft g_2 geht die Länge eines fest eingespannten Seiles von L_1 nach L_2 ent-

sprechend der Wärmedehnung und den veränderten Seilzugkräften.

$$L_2 = L_1 [1 + \alpha (t_2 - t_1)] \left(1 + \frac{S_{m2} - S_{m1}}{E \cdot q} \right) \quad (5)$$

Dabei sind S_{m1} und S_{m2} die mittleren Seilzugkräfte im Zustand 1 und 2, die durch abschnittweises Auswerten des Integrals

$$S_m = \frac{1}{L} \int_0^L S \, ds$$

bestimmt werden können.

Für die üblichen Anordnungen ($a \leqq 500$ m, $h < a$) gilt die Näherung

$$S_m = H \cdot \frac{L}{a} \quad (6)$$

3.2 Grundgleichungen für die Abspann- und Hängeisolatoren

Die Freileitungsseile werden mittels Abspann- und Hängeisolatoren an den Masten befestigt.

Bei der Behandlung von Spannfeldern mit grosser Spannweite und gleichmässigen Spannfeldbelastungen können bei der Auslegung die Isolatorketten vernachlässigt werden, da die Hängeisolatoren sich in einer senkrechten Lage befinden. d.h. nur das Seilgewicht V_l bzw. V_r tragen müssen und die Beanspruchung der Abspannisolatoren aus der Seilzugkraft S_l bzw. S_r abgeleitet werden kann.

Bei einer ungleichmässigen Belastung und bei einem unregelmässigen Verlauf der Spannfelder tritt eine Kopplung der Abschnitte über die Hängeisolatoren auf.

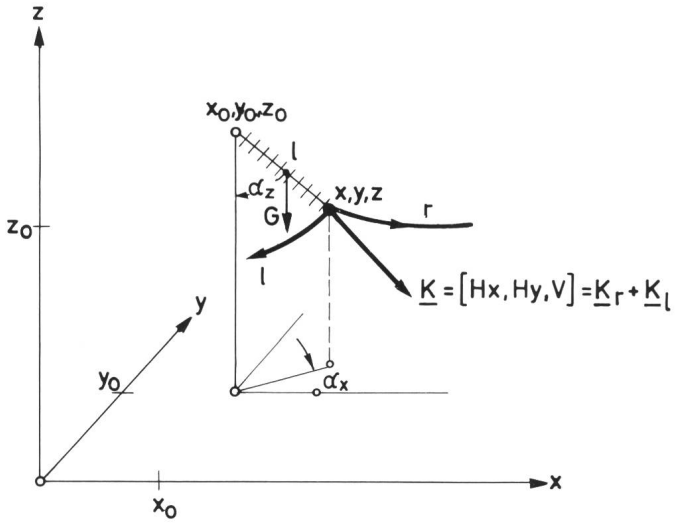
In Spannfeldern mit sehr kurzen Spannweiten, z.B. in Schaltanlagen, wird der Verlauf des Seils und die Beanspruchung durch die Abspannisolatoren wesentlich beeinflusst.

Die Verhältnisse einer Abspannung werden durch den Auslenkungswinkel α_x, α_z, die Isolatorlänge l, das Isolatorgewicht G und durch die Seilkräfte $\underline{K}_r$ und $\underline{K}_l$ gekennzeichnet (vgl. Fig. 2).

Ausgehend von den Gleichungen (3) und (4) und der Lage der Projektion der Spannfelder links und rechts auf die x-y-Ebene, gekennzeichnet durch die Winkel α_{sl} und α_{sr}, erhält man für die Seilkräfte die Beziehungen:

$$[K_l] = [H_l \cos\alpha_{sl}, H_l \sin\alpha_{sl}, V_l]$$
$$[K_r] = [H_r \cos\alpha_{sr}, H_r \sin\alpha_{sr}, V_r] \quad (7)$$

Fig. 2 Abspannung



Aus der Bedingung, dass im Gleichgewicht die Kräfte und das Moment im Seilaufhängepunkt gleich Null sein müssen, folgt:

$$\tan\alpha_x = \frac{H_l \sin\alpha_{sl} + H_r \sin\alpha_{sr}}{H_l \cos\alpha_{sl} + H_r \cos\alpha_{sr}}$$

$$\tan\alpha_z = \frac{H}{V_l + V_r + \frac{G}{2}} \quad (8)$$

mit

$$H = \frac{H_l \cos\alpha_{sl} + H_r \cos\alpha_{sr}}{\cos\alpha_x}$$

Aus den Vorzeichen der Kraftkomponenten und der Grösse des Winkels α_z kann auf die Beanspruchung der Abspannung (Kettenbelastung auf Zug oder Druck, Hochzug usw.) geschlossen werden.

Die Koordinaten x, y, z des Seilaufhängepunktes ergeben sich dann zu:

$$z = z_0 - l \cdot \cos\alpha_z$$
$$x = x_0 + l \cdot \sin\alpha_z \cdot \cos\alpha_x \quad (9)$$
$$y = y_0 + l \cdot \sin\alpha_z \cdot \sin\alpha_x$$

4. Aufgabenstellungen und ihre Lösungen

4.1 Zustandsgrössen, Lösungsverfahren

Der Durchhang und die Beanspruchung der Seile in den n Spannfeldern, die geometrische Lage und die Beanspruchung der n+1 Abspannungen wird bestimmt von:

- den Zustandsgrössen:

  $[x] = [[H], [\alpha_x], [\alpha_z]]$

- den Parametern:

  $[p] = [[g], [q], [t], [\alpha], [E], [x_0], [y_0], [z_0], [l], [G]]$

- den Nebenbedingungen:

  $[z] = [[L], [S]]$

Dabei sind:

$[H]$	$= [H_1 ... H_n]$	die Horizontalzugkräfte
$[g]$	$= [g_1 ... g_n]$	die Seilgewichtskräfte
$[q]$	$= [q_1 ... q_n]$	die Seilquerschnitte
$[t]$	$= [t_1 ... t_n]$	die Seiltemperaturen
$[\alpha]$	$= [\alpha_1 ... \alpha_n]$	die Wärmeausdehnungskoeffizienten der Seile
$[E]$	$= [E_1 ... E_n]$	die Elastizitätsmodule der Seile
$[L]$	$= [L_1 ... L_n]$	die Seillängen bei einer gegebenen Last [g] und Temperatur [t]
$[S_z]$	$= [S_{z1} ... S_{zn}]$	die zulässigen Seilzugkräfte

in den n-Spannfeldern und

$[x_0]$	$= [x_{01} ... x_{0\,n+1}]$	die Koordinaten der n+1 Abspannpunkte
$[y_0]$	$= [y_{01} ... y_{0\,n+1}]$	
$[z_0]$	$= [z_{01} ... z_{0\,n+1}]$	
$[l]$	$= [l_1 ... l_{n+1}]$	die Länge und das Gewicht der n+1 Abspannungen
$[G]$	$= [G_1 ... G_{n+1}]$	

Entsprechend der Aufgabenstellung ergeben die Grundgleichungen (1)...(9) ein System nichtlinearer Gleichungen:

$$f([x], [p], [z]) = 0$$

Dieses Gleichungssystem kann mit Hilfe des Newtonverfahrens gelöst werden:

Von einem Ausgangswert $[x]_i$ ausgehend wird dabei mit Hilfe der Funktionalmatrix $f'([x]_i, [p], [z])$ ein verbesserter Zustandsvektor $[x]_{i+1}$ ermittelt:

$$[x]_{i+1} = [x]_i - \omega \cdot f'([x]_i, [p], [z])^{-1} \cdot f([x]_i, [p], [z])$$

Dieser Prozess wird solange wiederholt, bis $f([x], [p], [z])$ hinreichend klein geworden ist oder einen Minimalwert erreicht hat.

Die Konvergenz dieses Prozesses wird mit Hilfe des Faktors ω beeinflusst:

- solange $|f([x]_{i+1})|$ abnimmt, d.h. $|f([x]_{i+1})| < |f([x]_i)|$, wird $\omega = 1$ gesetzt
- bei einer Zunahme von $|f([x]_{i+1})|$, d.h. $|f([x]_{i+1})| > |f([x]_i)|$. wird ω systematisch verkleinert, solange bis $|f([x]_{i+1})|$ wieder abnimmt oder stationär geworden ist, d.h. seinen Minimalwert erreicht hat.

Die Konvergenz hängt auch von einer sinnvollen Wahl der Startwerte $[x]_0$ ab.

Die Elemente der Funktionalmatrix werden numerisch berechnet:

$$\frac{\partial f_i([x], [p], [z])}{\partial x_k} \approx \frac{f_i([x_k + \Delta x_k], [p], [z]) - f_i([x_k], [p], [z])}{\Delta x_k}$$

4.2 Die Auslegung einer Freileitung (max. Seilzugkraft gegeben)

Eine Freileitung ist so auszulegen, dass in einer vorgegebenen Anordnung, gekennzeichnet durch die Parameter [p], die zulässige Seilzugkraft $[S_z]$ an keiner Stelle überschritten wird und der Seildurchhang keine unzulässigen Werte annimmt. Zu bestimmen sind ferner die Seillängen [L], der Auslenkungswinkel $[\alpha_x]$ und $[\alpha_z]$ der Abspannungen, die an den Abspannungen auftretenden Kräfte $[K_l] + [K_r]$ und der Durchhang [f] bzw. der Bodenabstand [b] der Spannfelder.

Diese Aufgabenstellung ist leider nicht eindeutig. Abhängig von der Grösse der zulässigen Seilzugkraft S_z hat die Zielfunktion

$$f(H) = H + g(Z_m - Z_s) - S_z$$

mehrere oder auch keine Lösungen. Die Abhängigkeit der Seilzugkraft S von der Horizontalzugkraft H (Gl. 3 und 2) hat ein ausgeprägtes Minimum (Fig. 3). Dabei nimmt der Durchhang f stetig ab. Praktisch brauchbar sind daher nur Lösungen mit möglichst kleinem Durchhang, d.h. grosser Horizontalkraft. Diese Lösungen erreicht man durch eine geeignete Vorgabe des Startwertes für H, z.B. $H = 0{,}9 \cdot S_z$.

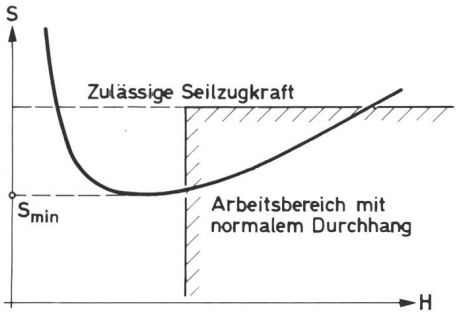


Fig. 3 Abhängigkeit der Seilzugkraft S von der Horizontalzugkraft H

Der Rechenalgorithmus löst die Aufgabenstellung iterativ in zwei sich wiederholenden Schritten, ausgehend von sinnvollen Startwerten für $[\alpha_x]$, $[\alpha_z]$, $[\alpha_s]$ und [H].

1.) Für *jedes Spannfeld* werden ermittelt:
   - Die Koordinaten der Seilaufhängepunkte: x_l, y_l, z_l, x_r, y_r, z_r mit Hilfe von (9)
   - Die Spannweite a, die Spannhöhe h und der Lagewinkel α_s
   - Die Horizontalzugkraft H durch iteratives Lösen der Gleichung (3):

$$f(H) = H + g(z_M - z_s) - S_z$$

mit Hilfe des Newtonverfahrens, wobei

$$z_s = z_M - \frac{h}{2} + c - \frac{L}{2}\sqrt{1 + \frac{4c^2}{L^2 - h^2}}$$

$$L = \sqrt{h^2 + \left(2c \sinh \frac{a}{2c}\right)^2}$$

$$c = \frac{H}{g}$$

z_M die Koordinate z des höher gelegenen Seilaufhängepunktes ist.

   - Die Koordinate z_s des Scheitelpunktes mit Hilfe von (2) und die Kräfte in den Seilaufhängepunkten mit Hilfe von (4).

2.) Für *jede Abspannung* werden ermittelt:
   - die Kräfte im Aufhängepunkt mit Hilfe von (7)
   - die Winkel α_x und α_z mit Hilfe von (8). α_x und α_z werden unterrelaxiert weiter verwendet.

Als Abbruchkriterium wird die Bedingung: $\Sigma |f_i(H_i)| / S_{Mi} < \delta$ oder $\Sigma |f_i(H_i)|$ minimal, verwendet (z.B. $\delta = 0{,}001$).

Ist die vorgebene Seilzugkraft S_z zu klein, so hat die Gleichung

$$f(H) = H + g(z_M - z_s) - S_z$$

keine Lösung. Das Newtonverfahren mit Schrittweitenoptimierung findet in diesem Fall das Minimum, d.h. die minimale Seilzugkraft $H + g(z_M - z_s)$.

4.3 Verhalten einer Freileitung bei einer Zustandsänderung

Ausgehend von einem Zustand $[x]_1$ mit den Parametern $[p]_1$ (vgl. 4.1), ist der Einfluss einer Parameteränderung $[\Delta p]$, d.h. ein Zustand $[x]_2$ zu ermitteln. Auch diese Aufgabenstellung wird iterativ, in zwei sich wiederholenden Schritten, ausgehend vom Zustand $[x]_1$ gelöst.

1.) Für *jedes Spannfeld* werden ermittelt:
   - Die Koordinaten der Seilaufhängepunkte mit Hilfe von (9)
   - Die Spannweite a, die Spannhöhe h und der Lagewinkel α_s
   - Die Horizontalzugkraft H durch iteratives Lösen der Gl. (5):

$$f(H) = L_2 - L_1[1 + \alpha(t_2 - t_1)]\left(1 + \frac{S_{m2} - S_{m1}}{E \cdot q}\right)$$

mit Hilfe des Newtonverfahrens, wobei:

$$L_2 = \sqrt{h^2 + \left(2c \sinh \frac{a}{2c}\right)^2}$$

$$c = \frac{H_2}{g_2}; \; S_{m2} = H_2 \cdot \frac{L_2}{a}; \; S_{m1} = H_1 \cdot \frac{L_1}{a}$$

ist.

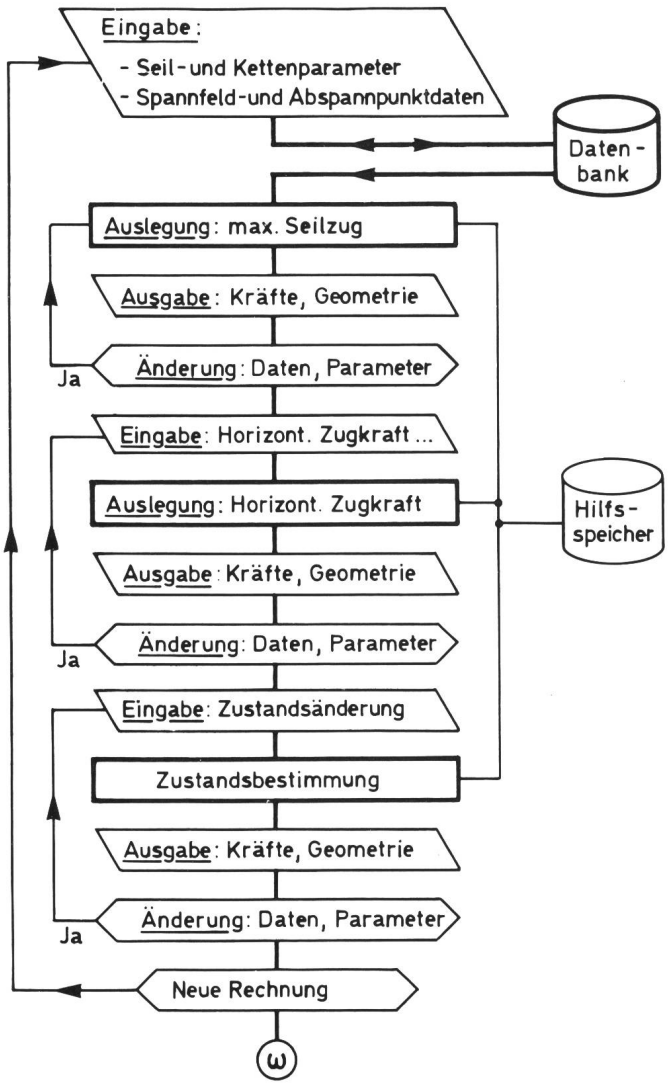


Fig. 4
Programm zur Auslegung von Freileitungen

- Die Koordinaten u_s und z_s des Scheitelpunktes und die Kräfte in den Aufhängepunkten.

2.) Für *jede Abspannung* werden ermittelt:

- die Kräfte im Aufhängepunkt mit Hilfe von (7)
- die Winkel α_x und α_z mit Hilfe von (8), wobei sie unterrelaxiert weiter verwendet werden.

Als Abbruchkriterium für die Iteration wird die Bedingung $\Sigma\,|fi(H_2)| < \delta$ verwendet.

4.4 Das Spannen einer Freileitung mit vorgegebener Horizontalzugkraft H

Beim Bau einer Freileitung wird das Seil über mehrere Spannfelder hinweg gezogen, von einem Abspannisolator zum nächsten. Dabei tritt in jedem Spannfeld dieselbe Horizontalzugkraft auf.

Ausgehend von den bei der Auslegungsrechnung (4.3 und 4.4) ermittelten zulässigen Horizontalzugkräften, wobei nur mit dem Minimalwert gearbeitet werden kann, müssen die Seillängen [L], die Koordinaten der Seilaufhängepunkte sowie die in den Abspannungen auftretenden Kräfte bestimmt werden, um das Seil ziehen zu können.

Auch diese Aufgabenstellung wird iterativ in zwei sich wiederholenden Schritten gelöst:

1.) Für *jedes Spannfeld* werden ermittelt, ausgehend von der Horizontalkraft H:

- die Koordinaten der Seilaufhängepunkte mit Hilfe von (9)
- die Seilparameter L, u_s und Z_s mit Hilfe von (2)
- die Kräfte in den Aufhängepunkten mit Hilfe von (4).

2.) Für *jede Abspannung* werden ermittelt:

- die Kräfte im Aufhängepunkt mit Hilfe von (7)
- der Auslenkungswinkel α_z und α_x mit Hilfe von (8), wobei α_x und α_z unterrelaxiert weiter verwendet werden.

Als Abbruchkriterium wird die Konvergenz der Seillänge $\Sigma\, L_i$ verwendet.

Das Verhalten der Freileitung bei einer Veränderung der Temperatur oder des Seilgewichtes ist anschliessend zu überprüfen (vgl. 4.3). Damit wird sichergestellt, dass bei allen Betriebszuständen keine unzulässigen Beanspruchungen oder Seildurchhänge auftreten können.

5. Implementierung auf Arbeitsplatzcomputern

In einem durchschnittlichen Kleinrechner können Programme entwikkelt, gespeichert und durchgeführt, Daten eingegeben, gespeichert, abgeändert und bearbeitet werden.

Die entsprechenden Informationen können auf Disketten oder Magnetbändern beliebig gespeichert werden. Zur Verwaltung der Daten und Programme stehen Hilfsprogramme zur Verfügung.

Mit diesen Möglichkeiten kann die Behandlung des Freileitungsauslegungsproblems sehr vereinfacht werden.

Es ist sinnvoll, immer wiederkehrende Daten wie z.B. die Parameter der im Betrieb verwendeten Leiter bzw. Seile, Abspann- und Aufhängeketten in entsprechenden Listen abzuspeichern. Dadurch erspart man sich das mühsame Sammeln und Eingeben von Daten. Die Datenbasis für die Freileitungsberechnung ist fehlerfrei.

Auch die Parameter geplanter oder bestehender Leitungen sollten gespeichert werden. Damit können interaktiv Entwicklungen durchgeführt, bestehende Anlagen überwacht oder erweitert werden.

Selbstverständlich müssen die Bearbeitungsprogramme diese Daten lesen können. Durch eine gewisse Abstraktion in den Bezeichnungen für die Leiter, Ketten und Leitungen kann die Eingabe vereinfacht werden.

Figur 4 zeigt schematisch den Aufbau des Programmsystems. Die Steuerung des Ablaufs erfolgt durch Kennworte. Die Ergebnisse können auf dem Bildschirm, auf einem Drucker oder entsprechend der Ausrüstung auch zeichnerisch dargestellt werden.

In Figur 5 ist ein typischer Ausdruck wiedergegeben.

Fig. 5
Ergebnisse des Kleinrechnerprogramms für die Auslegung von Freileitungen

```
Daten und Ergebnisse des Spannfeldes      1
                zwischen dem Mast:      '1    '
                     und dem Mast:      '2    '
-----------------------------------------------

        Daten aus dem File                 fde-fr4.txt

                          Seiltyp  :    'A    '

  Seilgewicht,Zusatzlast       [N/m] :    10            0
  Querschnitt                 [mm 2] :    297.8
  Max. Seilzugkraft  [N],    [N/mm2] :    20000         67.15918

  Elastizitaetsmodul         [N/mm2] :    74000
  Temperaturkoeffizient     [1/grd.] :    .0000196

  Temperatur                  [grd.] :    0

  Horizontalzugkraft  [N],   [N/mm2] :    16962.69      56.96002
  Max. Seilzugkraft   [N],   [N/mm2] :    20000         67.15918

  Seillaenge                     [m] :    445.0774
  Spannweite                     [m] :    398.7468
  Seildurchhang                  [m] :    13.064
  Auslenkung durch Windkraft     [m] :    0


Daten und Ergebnisse des Mastes :          '1    '
-----------------------------------------------

                    Kettentyp :          'M    '

   Kettenlaenge  [m]                  :    1.8
   Kettengewicht [kp]                 :    40

   Kettenauslenkung  AZ        [grd.] :    109.3253
   Kettenauslenkung  AX        [grd.] :    0
   Kettenauslenkung horiz.        [m] :    1.698579
   Kettenauslenkung vertikal      [m] :    .5956752

   Horizontalkraft   [N]              :    16962.69
   Vertikalkraft     [N]              :   -6144.845
   Res. Kraft        [N]              :    18041.4
```

Literatur

[1] *E. Maurer:* Die Berechnung der Freileitungen mit Rücksicht auf die mechanischen Verhältnisse der Leiter. SEV-Bulletin, 1936, S. 41...53, S. 65...75.

[2] *Rieger* und *Fischer:* Der Freileitungsbau. Springer-Verlag, Berlin 1973.

[3] *A. Halbig:* Beitrag zur Durchhangsermittlung bei Hochspannungsfreileitungen. ETZ-Report 10. VDE-Verlag, Berlin 1973.

[4] *P. Panzer* und *M. Kaiser:* Berechnung des Durchhanges von Freileitungen mit dem programmierbaren Taschenrechner HP67. Elektrizitätswirtschaft 80(1981), S. 288...291.