

# Mechanik des an Isoliertraversen aufgehängten Seils

Autor(en): **Beck, M.**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association Suisse des Electriciens, de l'Association des Entreprises électriques suisses**

Band (Jahr): **67 (1976)**

Heft 6

PDF erstellt am: **22.07.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-915135>

## **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.

# Mechanik des an Isoliertraversen aufgehängten Seils

Von M. Beck

621.315.1 : 621.315.62

Die folgenden Berechnungen zeigen, dass selbst bei grossen mechanischen Belastungsunterschieden der Leiterabschnitte nur relativ kleine Drehwinkel der Isoliertraversen (IT) auftreten. Ferner wird der Einsatz der IT in Leitungswinkeln und das Verhalten bei Leiterbruch untersucht.

Les calculs qui suivent montrent que, même lors de grands écarts des sollicitations mécaniques des sections de conducteurs, les traverses isolantes ne subissent que des torsions relativement faibles. L'auteur examine en outre l'emploi de ces traverses dans des coudes de lignes et le comportement dans le cas d'une rupture de conducteurs.

## 1. Gleichungen des Seilverlaufs; Annahmen für ein Zahlenbeispiel

Bei gleichmässiger Streckenlast ist der Seilverlauf eine Kettenlinie, die gut durch eine Parabel angenähert werden kann (Fig. 1). Bekanntlich bestimmen die Belastung pro Längeneinheit  $q$  und die Horizontalkomponente  $H$  des Seilzuges  $S$  den Parabelverlauf und die von der Mitte aus gezählte Bogenlänge  $s$ . Man erhält mit  $a = H/q$

$$y = x^2/2a \quad (1)$$

$$s = x + x^3/6a \quad (2)$$

Bei Belastungsänderung ergibt der veränderte Horizontalzug eine elastische Längenänderung  $\Delta s$ . Nach dem Hookeschen Gesetz gilt mit dem Elastizitätsmodul  $E$  und dem Leiterquerschnitt  $A$  (Index 1 für den ursprünglichen Zustand, Index 2 für den Zustand nachher):

$$\Delta s = \frac{(H_1 - H_2) \cdot x}{EA} \quad (3)$$

Da thermische Längenänderungen hier nicht wesentlich sind, wird die Temperatur als konstant angenommen.

Im folgenden soll neben der Angabe der Berechnungsweise ein Zahlenbeispiel mit folgenden Daten berechnet werden: Mastabstand  $l = 220$  m ( $x_0 = 110$  m);  $A = 4$  cm<sup>2</sup>, Aluminium mit  $E = 0,7 \cdot 10^6$  kp/cm<sup>2</sup>,  $\gamma = 2800$  kp/m<sup>3</sup>. 1 m Seillänge wiegt 1,12 kp;  $q_s = 1,12$  kp/m ist somit die Streckenlast ohne Eis oder Wind. Wenn 2 kp/m Eis das Seil belasten, beträgt die Streckenlast  $q_e = 3,12$  kp/m. Bei Belastung mit  $q_e$  soll der Durchhang  $y_{\max} = 8$  m betragen.

Aus Gl. (1) folgt für  $y(x = 110 \text{ m}) = 8$  m im Zustand 1:  $a_1 = 756$  m,  $H_1 = 2360$  kp und  $\sigma_1 \approx H/A = 5,9$  kp/mm<sup>2</sup>.

Für den Zustand 2 ohne Eis findet man den Horizontalzug  $H_2$  und die Spannung  $\sigma_2$  aus den Seillängen  $s_1$  und  $s_2$  mit Gl. (2) und Gl. (3):

$$s_1 = s_2 + \Delta s$$

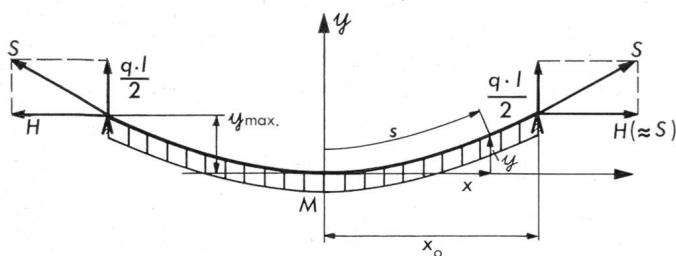


Fig. 1 Bezeichnungen

$l = 2x_0$	Spannweite
$s$	Bogenlänge
$y_{\max}$	maximaler Durchhang
$S$	Seilzug
$H$	Horizontalzug
$q$	Seilbelastung pro Längeneinheit

$$x_0 + \frac{x_0^3}{6a_1^2} = x_0 + \frac{x_0^3}{6a_2^2} + \frac{(H_1 - H_2) \cdot x_0}{EA}$$

Weil der gesuchte Horizontalzug  $H_2$  auch in  $a_2$  vorkommt, liegt eine implizite Gleichung dritten Grades vor. Man löst sie am besten iterativ.  $\Delta s$  ist klein und wird in einem ersten Versuch vernachlässigt. Man findet ein provisorisches  $H_2$  und bestimmt damit  $\Delta s$  für den nächsten Versuch. Erster Versuch:  $\Delta s = 0$ ,  $a_2 = 756$  m,  $H_2 = 850$  kp, daraus  $\Delta s = 0,06$  m.

Zweiter Versuch mit  $\Delta s = 0,06$  m:

$$a_2 = 820 \text{ m}, H_2 = 920 \text{ kp}, \sigma \approx 2,3 \text{ kp/mm}^2, y_{\max} = 7,4 \text{ m}$$

Dieses Ergebnis ist genügend genau, denn das neue  $\Delta s = 0,057$  m weicht nur wenig vom vorherigen ab.

## 2. Mast mit IT zwischen zwei Abspannmasten, gerade Leitung

Diese einfache Anordnung ergibt günstigere Verhältnisse als die in Abschnitt 3 und 4 behandelte. Hier zeigt sich indessen das Verhalten der IT besonders klar, und auf die noch einfachen Berechnungen kann nachher zurückgegriffen werden.

### 2.1 Linke Spannweite mit Eis, rechte Spannweite nur Eigengewicht

Gemäss Fig. 2 ergibt eine Drehung der IT eine Verschiebung des mittleren Aufhängepunktes A um  $2u$  nach links. Zu beachten ist, dass sich auch die Mitten der Parabelbogen je um  $u$  nach links verschieben. Der Horizontalzug ist trotz ungleicher Belastung links und rechts gleich. Die wesentlichen Gleichungen findet man durch Vergleichen der halben Seillängen vorher (symmetrische Belastung, z. B. beidseits  $q_e$ , Index 1) und nachher (unsymmetrische Belastung, linke Seite Index 1, rechte Seite Index r):

$$s_1 = s_1 + \Delta s_1 \text{ und } s_1 = s_r + \Delta s_r \text{ ergibt:}$$

$$\text{links } x_0 + \frac{x_0^3}{6a_1^2} = (x_0 - u) + \frac{(x_0 - u)^3}{6a_1^2} + \Delta s_1 \quad (4)$$

$$\text{rechts } x_0 + \frac{x_0^3}{6a_1^2} = (x_0 + u) + \frac{(x_0 + u)^3}{6a_r^2} + \Delta s_r \quad (5)$$

In diesen beiden Gleichungen für  $u$  und für  $H_1 = H_r$ , welche in  $a_1, a_r$  resp. in  $\Delta s_1, \Delta s_r$  vorkommen, darf man in den kubischen Korrekturgliedern  $(x_0 - u)^3 \approx x_0^3 \approx (x_0 + u)^3$  setzen; ferner hat  $H_1 = H_r$  zur Folge, dass  $\Delta s_1 = \Delta s_r$ . Den Wert für  $a_1$  entnimmt man dem Abschnitt 1. Aus  $a_1 = H_1/3,12$  kp/m und  $a_r = H_r/1,12$  kp/m folgt  $a_r = 2,79 a_1$ .

Damit kann man die Gl. (4) und (5) iterativ lösen, wie dies in Abschnitt 1 angedeutet ist. In Tabelle I sind auch die Lösungen für den Fall angegeben, dass links nur die halbe Normeislast wirkt ( $q = 2,12$  kp/m), ferner für die doppelte Eislast ( $q = 5,12$  kp/m). Zur Bestimmung des Drehwinkels der IT ist ein Radius  $r$  von 2,1 m eingesetzt.

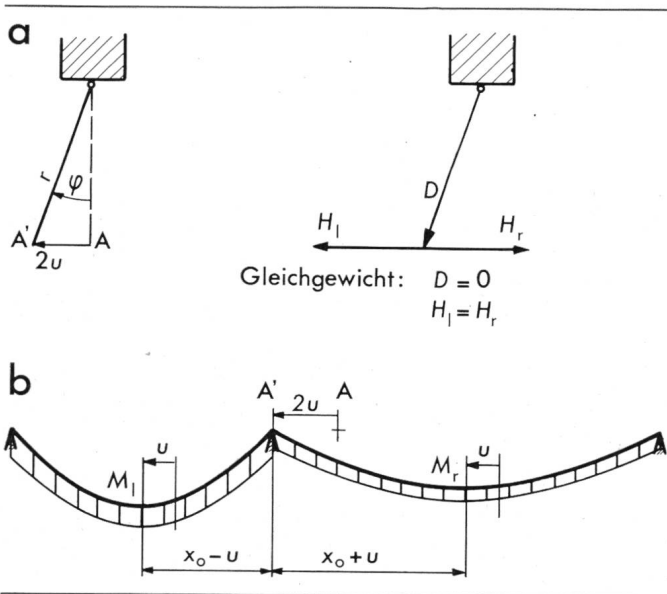


Fig. 2 Gerade Leitung, Mast mit IT zwischen zwei Abspannmasten

a Geometrie und Kräfte an der IT

b Geometrie der Leiterabschnitte

A, A' Seilauflängepunkte

2u Verschiebung des Aufhängepunktes

D Druckbeanspruchung der IT

(Weitere Bezeichnungen siehe Fig. 1 und im Text)

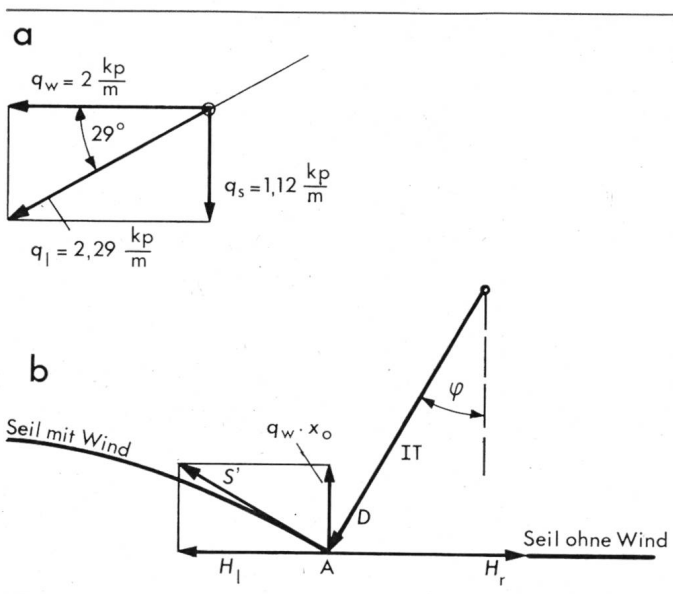


Fig. 3 Seil mit einseitiger Windlast

a Resultierende Belastung des Seils mit Zahlenbeispiel (Schnitt)

b Kräfte im Aufhängepunkt

$q_w$  Windlast

(Weitere Bezeichnungen siehe Fig. 1 und 2)

## 2.2 Linke Spannweite mit Wind, rechte Spannweite nur Eigengewicht

Selbst für die extrem einseitige Annahme, dass auf der ganzen linken Spannweite eine horizontale Windlast  $q_w = 2 \text{ kp/m}$  wirke (entsprechend einer Windgeschwindigkeit von etwas über 100 km/h), während im rechten Abschnitt keine Windlast, wird die Drehung der IT nicht gross. Gemäss Fig. 3a verläuft das linke Seil in einer schiefen Ebene, die durch die resultierende Belastung  $q_l = 2,29 \text{ kp/m}$  bestimmt ist. Fig. 3b gibt Auskunft über die Kräfte im Aufhängepunkt A der IT. Die IT erhält Druck D, und der Horizontalzug ist jetzt links und rechts nicht mehr gleich. Der Unterschied ist aber klein: im Beispiel ist  $H_r - H_l = 50 \text{ kp}$ . Wie in Abschnitt 2.1 vergleicht man für die linke und für die rechte Seite die Seillänge bei einseitigem Wind mit derjenigen für eine vorherige symmetrische Belastung. Gl. (4) und Gl. (5) gelten also auch hier. Durch Probieren und Iteration findet man aus ihnen für die obenstehende Belastung  $H_l = 1410 \text{ kp}$ ,  $H_r = 1460 \text{ kp}$ ,  $2u = 0,45 \text{ m}$ ,  $\varphi = 12^\circ$ .

## 3. Mehrere Tragmaste mit Isoliertraversen, gerade Leitung

Offensichtlich ist der (unwahrscheinliche) Fall am ungünstigsten, dass ein Randfeld (z. B. das linke) volle Eislast aufweist ( $q_e$ ), während die übrigen Felder nur durch das Eigen-

gewicht des Seils belastet sind ( $q_s$ ). Fig. 2a gilt auch hier für alle IT-Aufhängungen, folglich ist der Horizontalzug in allen Feldern gleich. Für das linke Feld ist  $a_l = H/3,12 \text{ kp/m}$ , für alle übrigen Felder ist  $a_r = H/1,12 \text{ kp/m}$ ; somit haben alle diese Felder gleiche Parabelbögen.

Der Vergleich der Seillängen mit der vorherigen symmetrischen Belastung führt für alle Felder ohne Zusatzlast auf Gl. (5). Für das belastete linke Randfeld ist die notwendige Anpassung von Gl. (4) aus den Fig. 4a und 4b ersichtlich. Man findet bei n Tragmasten mit IT

$$x_0 + \frac{x_0^3}{6a_l^2} = (x_0 - nu) + \frac{(x_0 - nu)^3}{6a_r^2} + \Delta s_1 \quad (4a)$$

wobei  $(x_0 - nu)^3 \approx x_0^3$ .

Die Resultate des Zahlenbeispiels sind in den Fig. 4a, b, c eingetragen. Bei einer grösseren Anzahl von Feldern wird der Drehwinkel der linken IT unangenehm gross. Z. B. beträgt bei  $n = 4$   $\varphi_A = 49,7^\circ$ . Je grösser die Zahl der Tragmaste, desto unwahrscheinlicher ist aber auch die getroffene Belastungsannahme. Bei Berücksichtigung der IT in Normen sollte hier eine reduzierte Eislast zugebilligt werden, z. B. bei n Tragmasten als Eislast im einzig belasteten Randfeld

$2 \cdot \left(1 - \frac{n-1}{2n}\right) \text{ kp/m}$  statt  $2 \text{ kp/m}$ . Im Zahlenbeispiel findet man dann anstelle der Resultate in Fig. 4b

$n = 3$ ,  $q_l = 2,45 \text{ kp/m}$  statt  $3,12 \text{ kp/m}$ ,  $H = 1240 \text{ kp}$ ,

$2u = 0,33 \text{ m}$

$\varphi_A = 28,4^\circ$ ,  $\varphi_B = 18,5^\circ$ ,  $\varphi_C = 9,1^\circ$

ferner für  $n = 4$   $\varphi_A = 32,2^\circ$ .

Damit werden die Drehwinkel der IT erträglich, das Seil kommt dem Mast nicht zu nahe. Immerhin: bei einer grösseren Zahl von Tragmasten wird die Seilauflänge ziemlich beweglich.

Horizontalzug H, Verschiebung des Aufhängepunktes u und Drehwinkel  $\varphi$

Tabelle I

Last links	Last rechts	$H_l = H_r$	2u	$\varphi$
2,12 kp/m	1,12 kp/m	1350 kp	0,39 m	10,8°
3,12 kp/m	1,12 kp/m	1820 kp	0,57 m	15,7°
5,12 kp/m	1,12 kp/m	2750 kp	0,73 m	20,5°

#### 4. Tragwinkelmast mit Isoliertraverse

Die Berechnungen sind in diesem Fall aufwendiger. Bei einer unsymmetrischen Belastung, die eine Auslenkung der IT um  $\varphi$  ergibt, sind die Horizontalzüge links und rechts nicht mehr gleich, sondern in der in Fig. 5a angegebenen Weise voneinander abhängig. Vor allem aber ist die Verschiebung des Seilaufhängepunktes in der Seilrichtung links nicht gleich wie in der Seilrichtung rechts, sondern nach Fig. 5b zu ermitteln. In der Folge ist in Gl. (4)  $u$  durch  $u_l$  und in Gl. (5)  $u$  durch  $u_r$  zu ersetzen. Untersucht wurde eine Anordnung nach Fig. 5c mit einem Knickwinkel der Leitung von  $180^\circ - 2\beta$ . In Tabelle II sind die Resultate des Zahlenbeispiels für  $q_l = 3,12 \text{ kp/m}$  und  $q_r = 1,12 \text{ kp/m}$  zusammengestellt.

Erwartungsgemäss wird  $\varphi$  grösser bei zunehmendem Knickwinkel.  $\beta = 60^\circ$  kommt praktisch kaum mehr in Frage. In diesem Fall müsste die Stabilität der Anordnung genauer untersucht werden.

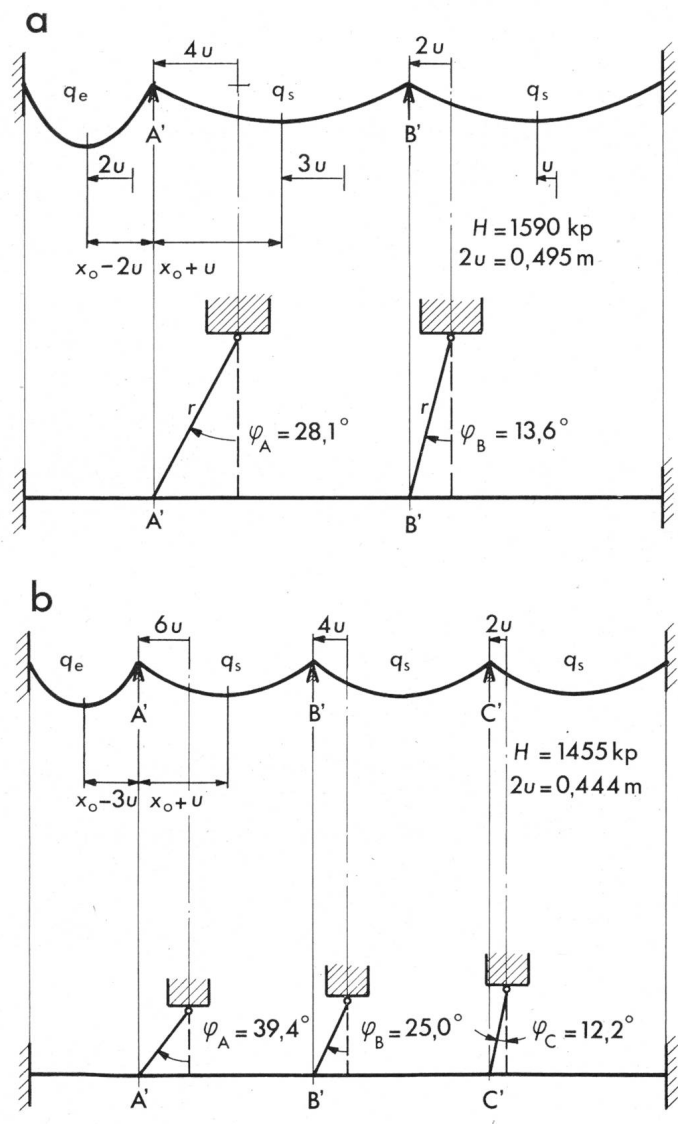


Fig. 4 Gerade Leitung mit mehreren Masten mit IT  
Verschiebung der Aufhängepunkte und Horizontalzug bei 2 Masten (a) resp. 3 Masten (b) mit IT  
A', B', C' Aufhängepunkte  
(Weitere Bezeichnungen siehe Fig. 1...3)

Horizontalzug  $H$  und Drehwinkel  $\varphi$  bei verschiedenen Knickwinkeln ( $180^\circ - 2\beta$ )

Tabelle II

$\beta = 90^\circ$	$H_l = H_r$	$H_l = H_r = 1820 \text{ kp}$	$\varphi = 15,7^\circ$
$\beta = 80^\circ$	$H_l = 1775 \text{ kp}$	$H_r = 1985 \text{ kp}$	$\varphi = 17,5^\circ$
$\beta = 70^\circ$	$H_l = 1710 \text{ kp}$	$H_r = 2260 \text{ kp}$	$\varphi = 21^\circ$
$\beta = 60^\circ$	$H_l = 1520 \text{ kp}$	$H_r = 3200 \text{ kp}$	$\varphi = 31^\circ$

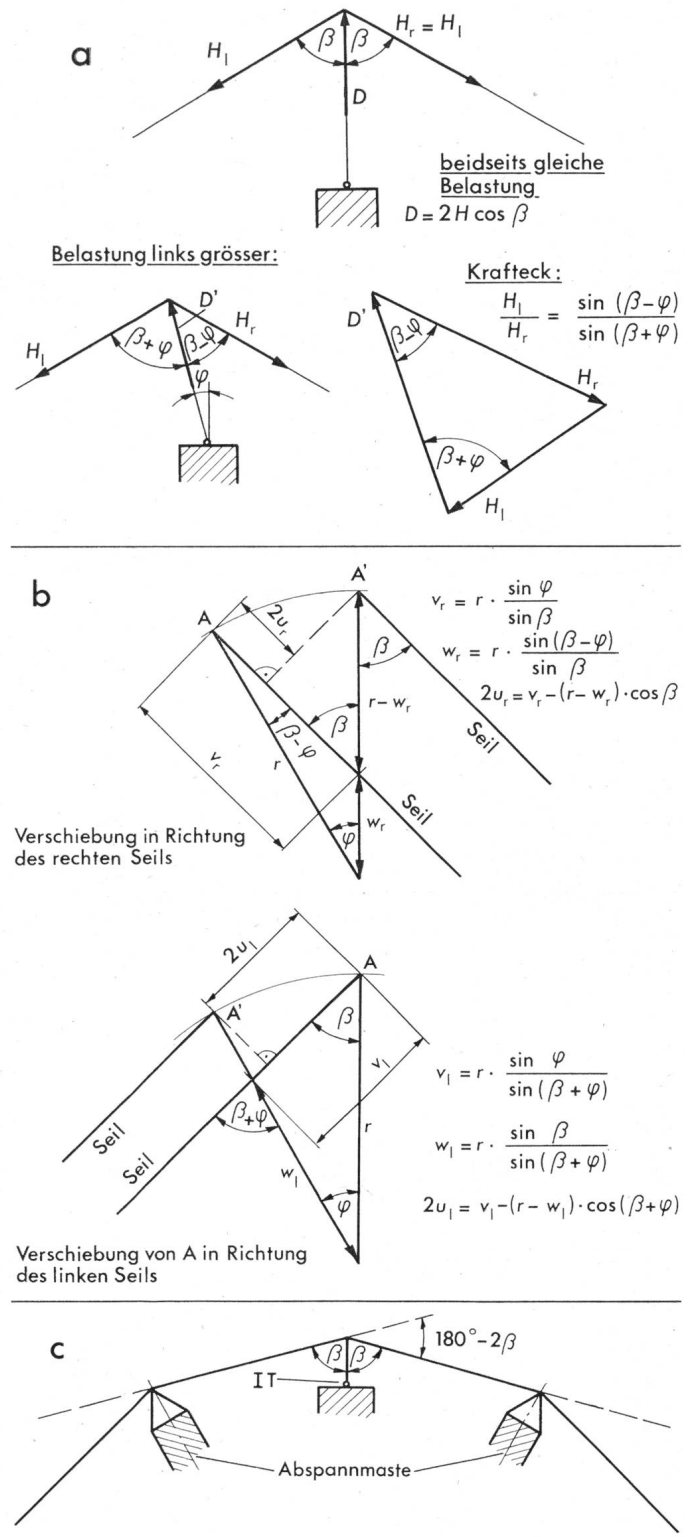


Fig. 5 Tragwinkelmast mit IT  
a Kräfte bei beidseitig gleicher sowie verschiedener Belastung  
b Verschiebung des Seilaufhängepunktes bei Drehung der IT  
c Anordnung für das Zahlenbeispiel  
 $180^\circ - 2\beta$  Knickwinkel der Leitung  
(Weitere Bezeichnungen siehe Fig. 1...4)

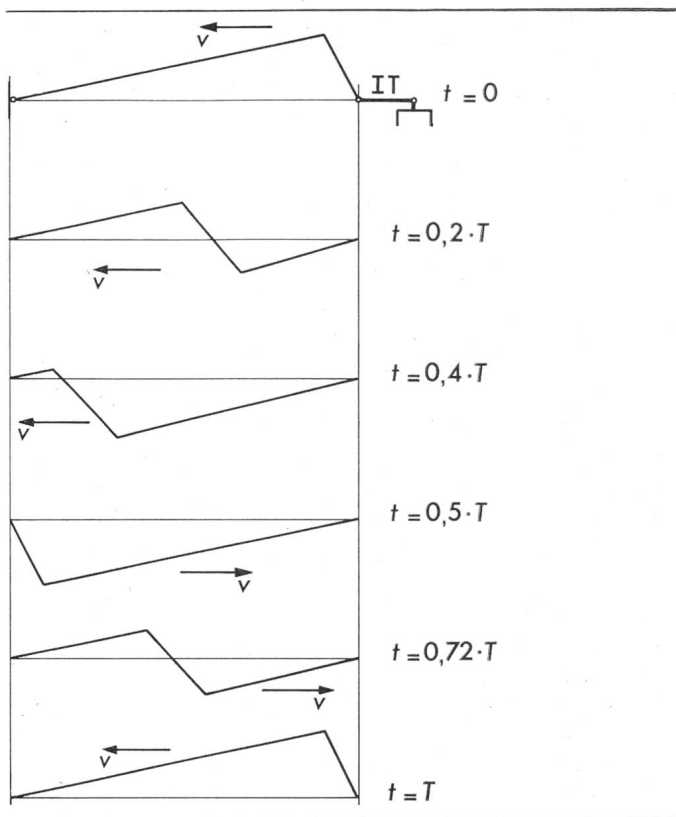


Fig. 6 Bewegung des Seils nach einem Leiterbruch  
 $v$  Wellengeschwindigkeit  
 $T = 2l/v$  Laufzeit

## 5. Die Isoliertraverse bei Leiterbruch

Bei einem Leiterbruch wird der nur noch einseitige Horizontalzug die IT im wesentlichen um  $90^\circ$  dem Mast zu drehen. Diese wird jedoch kaum über  $90^\circ$  hinausschwingen. Zwei Gründe machen dies plausibel: Bei der meist etwas geneigten Drehachse der IT ergibt die Schwerkraft ein das Abdrehen behinderndes Moment; ferner geben auch die durch Wanderwellen im intakten Seil bewirkten Kräfte ein vom Mast weg-treibendes Moment.

In Fig. 6 ist der Verlauf der Wanderwelle in starker Vereinfachung dargestellt. Man erkennt zunächst die sich bei plötzlichem Umschwenken der IT ergebende idealisierte Seilform, dann deren Hin- und Herlaufen zwischen zwei festen Enden (konstruiert mit der Methode der nach links und der nach rechts laufenden Welle z. B. [1]). Offensichtlich zieht die zurückkommende Welle die IT vom Mast weg. Für eine genaue mathematische Untersuchung der Wirkung des intakten Seils auf die IT müssten die allgemeinen Bewegungsgleichungen des Seils [1] mit einem Computerprogramm integriert werden, wobei die Abklärung der Randbedingungen wohl schwierig wäre.

### Literatur

[1] I. Szabó: Höhere technische Mechanik. Nach Vorlesungen. 5. Auflage. Berlin/Heidelberg, Springer-Verlag, 1972.

### Adresse des Autors

Max Beck, Lehrer am Technikum Burgdorf, 3400 Burgdorf.

## Versuche über das Verhalten bei Lastabwurf und Seilbruch

Von T. Muntwiler, F. Mahnig und H. Müller

### 1. Versuchsanordnung

Um das mechanische Verhalten der Isoliertraversen im Betrieb, insbesondere bei Lastabwurf und bei Seilbruch, zu untersuchen, wurde eine spezielle Versuchsanordnung aufgebaut. Als Versuchsstrecke dienten drei aufeinanderfolgende Masten einer zum Abbruch bestimmten 132-kV-Übertragungsleitung der SBB. Die IT montierte man am Mittelmast anstelle eines bestehenden Auslegers (Fig. 1). Ein Aldreyseil von  $400 \text{ mm}^2$  Querschnitt wurde an den beiden äusseren Masten abgespannt und in die IT eingeklemmt (Montagespannung  $2,5 \text{ kp/mm}^2$  bei  $0^\circ \text{C}$ ).

Die Einrichtungen zur Simulation von Leiter-Zusatzlasten waren der Einfachheit halber je in der Mitte der beiden Spannweiten angebracht (Fig. 2). Auf der einen Seite konnte die gewünschte Belastung durch Anhängen verschiedener Gewichte ( $F_2$ ) erreicht werden. In der andern Spannweite diente eine Federwaage ( $F_1$ ) zur Einstellung der Vertikal-kraft. An dieser Stelle befand sich auch ein Auslösemechanismus, der es erlaubte, die Zusatzlast der betreffenden Spannweite «abzuwerfen». Die Bewegungen des Seiles und der IT konnten mit an verschiedenen Punkten aufgestellten Filmkameras festgehalten werden.

Speziell untersucht wurde die Beanspruchung der Druckstrebe. Für die Spannungsmessungen wurde der kabelseitige Isolator als Messobjekt vorbereitet. Zur Messwertaufnahme dienten Dehnungsmeßstreifen, die, in den höchstbean-

621.315.1 : 621.315.62

spruchten Zonen des Isolators aufgeklebt, eine kontinuierliche Messung der bei der Betriebsbelastung auftretenden Dehnungen erlauben. Um die Zug-Druck- und Biegebelastung unterscheiden zu können, wurden 4 Meßstellen jeweils um  $90^\circ$  versetzt angebracht. Deren Lage ist in Fig. 3 eingezeichnet. Fig. 4 zeigt 2 Meßstellen (A und B) am Isolator mit 4 Kompensationsmeßstreifen, die zwecks Temperatur-

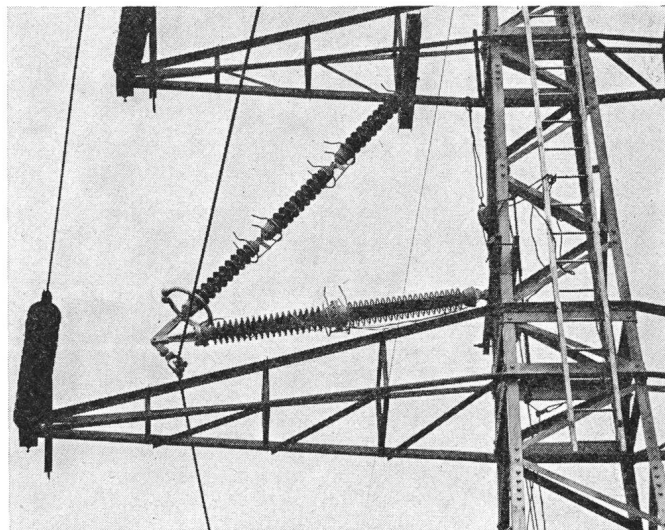


Fig. 1 Freileitungsmast mit Isoliertraverse (Versuchsanordnung)