

**Zeitschrift:** Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins  
**Herausgeber:** Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke  
**Band:** 48 (1957)  
**Heft:** 13

**Artikel:** Beitrag zur Mechanik der einfach-windschiefen Fahrleitung  
**Autor:** Pflanze, W.  
**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-1060613>

### **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:** 14.01.2026

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

# Beitrag zur Mechanik der einfach-windschiefen Fahrleitung

Von W. Pflanzner, Zürich

621.332.31

Es werden einige Grundgleichungen sowie die Beziehungen zwischen Temperatur und Zugspannung im Fahrdraht für die nicht nachgespannte, einfach-windschiefe Fahrleitung abgeleitet und die erhaltene Zustandsgleichung mit der bekannten, von Herzog angegebenen Zustandsgleichung für starr oder senkrecht aufgehängte Leitungen verglichen.

On explique quelques équations de base, ainsi que les relations entre température et contrainte à la traction pour la ligne de contact à pendules inclinés et sans tendeurs. L'équation générale obtenue est comparée avec celle à suspension rigide ou à pendule vertical, selon Herzog.

## 1. Allgemeines

Bei jeder Art der elektrischen Traktion deren Triebfahrzeugen die Energie über eine Fahrleitung zugeführt wird, ist das Kontaktsystem Fahrdraht-Stromabnehmer ein nicht zu vernachlässigender Bestandteil der gesamten Anlagen und Ausrüstungen.

Unterbrüche in der Stromabnahme können nicht nur den Betrieb mit Höchstgeschwindigkeiten erschweren oder gar verunmöglichen, sie sind, da stets mit Funken oder Lichtbogen verbunden, eine Quelle von Radiostörungen und kostspieligen Abnützungen an Fahrdraht und Stromabnehmer-schleifstücken.

Der Stromabnehmer muss, um auf seinem Weg längs des Fahrdrahtes in ununterbrochenem Kontakt mit diesem zu bleiben, nebst den vom Gleis oder der Fahrbahn herrührenden Erschütterungen und Stösse auch die durch den Durchhang des Fahrdrahtes bedingten Unterschiede in seiner Höhenlage ausgleichen. Ein zwischen den Punkten  $S$  und  $S_1$  (Fig. 1) mit der Zugspannung  $\sigma$  aufgehängter Draht bildet eine parabelähnliche Durchhangskurve. Liegen die beiden Aufhängepunkte  $S$  und  $S_1$  auf einer Parallelen zur, als horizontal angenommenen Fahrbahn, so fällt die Tangente der Durchhangskurve in der Mitte zwischen  $S$  und  $S_1$  mit der Horizontalen zusammen und weist auf den Aufhängepunkten eine grösste Neigung gegen diese auf.

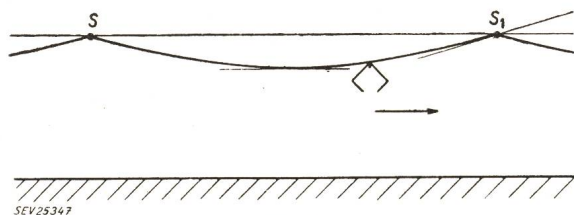


Fig. 1

Längenprofil einer Fahrleitung bei ebener Fahrbahn  
 $S, S_1$  Aufhängepunkte des Fahrdrahtes

Bewegt sich ein Stromabnehmer in Richtung des Pfeiles mit einer, in Bezug auf seine Trägheit zu grossen Geschwindigkeit, so vermag er gegen den Aufhängepunkt hin dem relativ steilen Anstieg nicht mehr zu folgen und springt vom Fahrdraht ab [1; 2]<sup>1)</sup>. Der Durchhang der Fahrleitung und damit die Grösse des Anstieges gegen die Aufhängepunkte hin ist abhängig von:

- a) der Distanz der Aufhängepunkte und
- b) der Zugspannung im Fahrdraht.

Um einen möglichst geringen Anstieg zu erhalten, sollten die Spannweite klein und die Zugspannung

hoch gewählt werden; für die Wahl der ersten bilden wirtschaftliche Gründe eine nicht zu unterschreitende Grenze und die zweite ist nach oben durch die Zugfestigkeit des Leitermaterials begrenzt. Mit einmal festgelegten Grössen kann somit für eine bestimmte Anlage eine optimale Durchhangskurve des Fahrdrahtes erhalten werden.

Von besonderem Interesse ist nun das Verhalten der Zugspannung in Abhängigkeit der Fahrdrahttemperatur. Bekanntlich fällt die Zugspannung in einem starr zwischen zwei Punkten ausgespannten Leiter bei zunehmender Temperatur infolge der Erwärmung durch den Strom oder klimatischer Einflüsse stark ab. Damit wird bei fester Spannweite der Durchhang grösser, oder was das Gleiche bedeutet, der Anstieg zum Aufhängepunkt hin steiler und die Fahrleitung in bezug auf den Lauf des Stromabnehmers ungünstiger. Dieser Zugspannungsverminderung bei steigender Temperatur kann durch Nachspannen des Fahrdrahtes mittels Spannschloss, Feder oder Gewichten begegnet werden. Dabei muss der Zug der Nachspannung möglichst ohne Verlust auf alle Spannfelder übertragen werden; die Fahrleitung muss also in der Leitungsrichtung möglichst frei beweglich sein. Diese Forderung kann nur durch besondere Massnahmen, wie bewegliche Ausleger oder Gleitklemmen an den Stützpunkten und dgl., erreicht werden. Die längs der geraden Leitungsachse im Zickzack verlegte und an schiefen Pendeln aufgehängte Fahrleitung, im folgenden kurz einfach-windschiefe Leitung genannt, weist auch in der Wechselwirkung zwischen Stromabnehmer und Fahrleitung ein von der starren Leitung abweichendes Verhalten auf [3].

Für die starre Leitung ist der Zusammenhang Temperatur—Zugspannung durch die Zustandsgleichung von Herzog beschrieben; für die einfach-windschiefe Leitung wird dieser im folgenden dargestellt.

## 2. Grundgleichungen

Fig. 2 zeigt ein Leitungsstück im Grund- und Aufriss sowie in Seitenansicht. Darin bedeuten:

- $\alpha$  Zickzackwinkel
- $\beta$  Pendelwinkel
- $s_i$  ideelle Spannweite [m]
- $s$  wirkliche Spannweite [m]
- $f$  Durchhang des Leiters [m]
- $b$  horizontale Distanz Leitungsachse—Stützpunkt (Aufhängepunkt des Pendels) [m]
- $b_1$  horizontale Distanz Leitungsachse—Aufhängepunkt des Leiters [m]
- $b_2$  horizontale Distanz Aufhängepunkt des Leiters—Stützpunkt [m]
- $l_p$  Pendellänge [m]

<sup>1)</sup> siehe Literaturverzeichnis am Schluss des Aufsatzes.



$F$  Zugkraft im Leiter [kg]

$F_\alpha$  Winkelzug [kg]

$G$  am Aufhängepunkt angreifendes Gewicht des Leiters [kg]

Der Index 0 weist auf den Ausgangszustand hin; die strichpunktierten Linien geben die Lage der Leitung nach einer Temperaturänderung, hier Temperaturerhöhung, an.

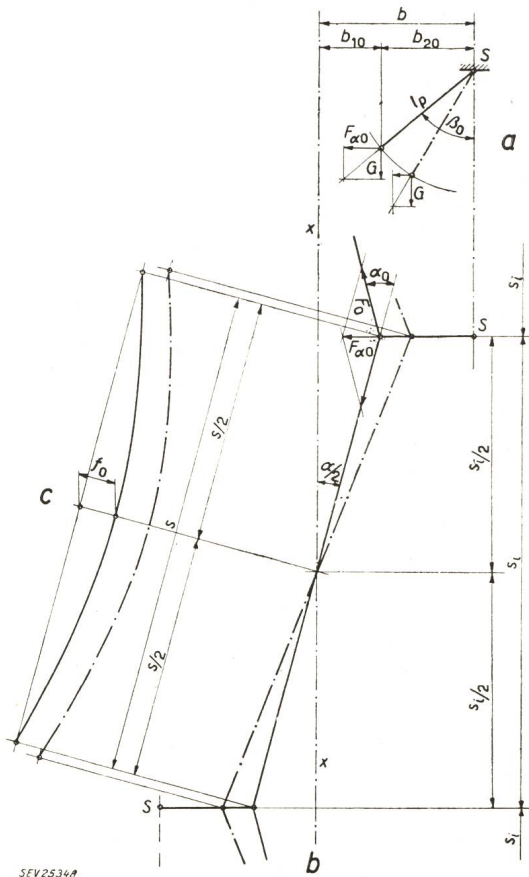


Fig. 2

Leitung in Aufriss (a), Grundriss (b) und Seitenansicht (c)  
S Stützpunkte; x-x Leitungsachse in Aufriss, Grundriss und  
Seitenansicht; der Index 0 bezeichnet den Ausgangszustand  
Weitere Bezeichnungen siehe im Text

Weitere im Text verwendete Symbole:

$l$  Länge des Leiters [m]

$A$  Querschnitt des Leiters [mm<sup>2</sup>]

$\sigma$  spezifische Zugspannung des Leiters  
[kg/mm<sup>2</sup>]

$E$  Elastizitätsmodul des Leitungsmaterials  
[kg/mm<sup>2</sup>]

$g$  Gewicht des Leiters pro m Länge [kg/m]

$\gamma$  virtuelles Gewicht =  $g/A$  [kg/m, mm<sup>2</sup>]

$t$  Temperatur [°C]

$\alpha_t$  Ausdehnungskoeffizient des Leitermaterials  
[°C<sup>-1</sup>]

Der Berechnung seien folgende vereinfachende Annahmen zu Grunde gelegt:

- Die Leitung setze sich beidseitig der betrachteten Spannweite in genau gleichen Spannfeldern fort;
- die Stützpunkte S seien fest;
- die Pendellänge und
- der Ausdehnungskoeffizient des Leitermaterials seien im betrachteten Gebiet konstant.

Aus Fig. 2 lassen sich folgende Beziehungen ablesen:

$$F_\alpha = 2F \sin \frac{\alpha}{2} \quad (1)$$

$$\operatorname{tg} \beta = \frac{F_\alpha}{G} \quad (2)$$

$$s = \frac{s_i}{\cos \frac{\alpha}{2}} \quad (3)$$

Das Gewicht ist mit genügender Genauigkeit durch

$$G = s g \quad (4)$$

bestimmt. Damit und mit

$$F = A \sigma \quad (5)$$

wird

$$\operatorname{tg} \beta = \frac{\sigma \sin \alpha}{s_i \gamma} \quad (6)$$

Der Pendelwinkel ist demnach eine Funktion der Zugspannung, des Zickzackwinkels, der ideellen Spannweite und des virtuellen Gewichtes.

Aus Fig. 2 kann weiter abgeleitet werden:

$$b_1 = \frac{s_i}{2} \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} \quad (7)$$

$$b_2 = l_p \sin \beta \quad (8)$$

und

$$b = b_1 + b_2 = \frac{s_i}{2} \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} + l_p \sin \beta \quad (9)$$

Beim Projektieren einer Leitung werden üblicherweise folgende 5 Grössen innerhalb bestimmter, durch die praktische Anwendung gegebener Grenzen gewählt oder bestimmt:

1. Dimension und Material des Leiters, d. h. die Grösse  $\gamma$ .

2. Die für eine Minimaltemperatur (= Ausgangstemperatur) und für das gewählte Material maximal zulässige Zugspannung  $\sigma_{max}$ .

3. Die ideelle (höchstzulässige) Spannweite  $s_i$ .

4. Der auf die Ausgangstemperatur bezogene Zickzackwinkel  $\alpha_0$ .

5. Die Pendellänge  $l_p$ .

Während die erste Grösse zur Hauptsache durch die elektrischen Verhältnisse bestimmt ist, wird die durch behördliche Vorschriften [4] begrenzte maximale Zugspannung möglichst hoch gewählt, um bei grossen Spannweiten den geringstmöglichen Durchhang zu erhalten. Spannweite, Zickzackwinkel, Zugspannung und Pendelwinkel sind nach Gl. (6) miteinander verknüpft. Nach praktischen Erfahrungen werden zur vorher bestimmten Zugspannung Spannweite und Zickzackwinkel häufig so gewählt, dass ein Pendelwinkel von 30°...40° resultiert. In Fig. 3 ist der Zickzackwinkel in Funktion der Zugspannung für Spannweiten von 30, 35, 40 und 45 m und einem Pendelwinkel von 35° aufgetragen. An Hand folgender Überlegung kann gezeigt werden, dass der Zickzackwinkel von der Temperatur abhängig ist:

Eine durch Temperaturänderungen bedingte Variation der Zugspannung (der Zugkraft im Leiter) verändert nach Gl. (1) den Winkelzug. In der Folge davon ändert sich auch der Pendelwinkel  $\beta$ , da das Gewicht, Gl. (4), bzw.  $\gamma$  konstant bleibt. Die Änderung des Pendelwinkels  $\beta$  bedingt aber auch eine Änderung des Zickzackwinkels. Diese wiederum wirkt zurück auf den Winkelzug  $F_\alpha$ .

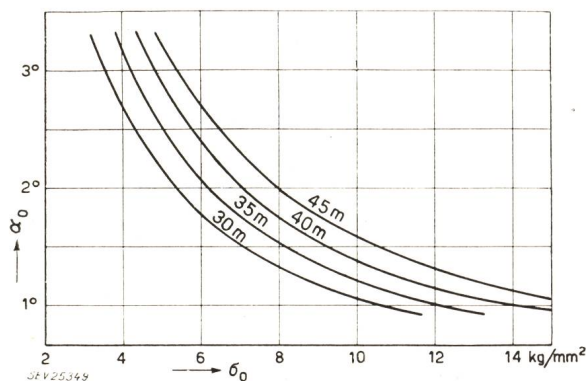


Fig. 3

Zickzackwinkel  $\alpha_0$  in Funktion der Zugspannung  $\sigma_0$  bei einem Pendelwinkel von  $\beta_0 = 35^\circ$  und  $s_i$  als Parameter. Die Spannweiten  $s_i$  sind neben den entsprechenden Kurven angegeben.

Für die Ableitung der Zustandsgleichung wird  $b$  [Gl. (9)] zweckmässig durch die 5 oben angeführten, die Leitung vollständig bestimmenden, Grössen ausgedrückt:

Unter Anwendung der Beziehung  $\sin x = \frac{\tan x}{\sqrt{1 + \tan^2 x}}$  auf Gl. (6), und nach Einsetzung von  $\sin \beta$  in Gl. (8) ergibt sich mit Gl. (7):

$$b = \frac{s_i}{2} \tan \frac{\alpha}{2} + \frac{l_p \sigma \sin \alpha}{\sqrt{s_i^2 \gamma^2 + \sigma^2 \sin^2 \alpha}} \quad (10)$$

Da  $\alpha$  nicht mehr als etwa  $3^\circ$  gewählt wird, kann man für  $\tan \frac{\alpha}{2} \approx \frac{1}{2} \tan \alpha$  und für  $\tan \alpha \approx \sin \alpha$  setzen und

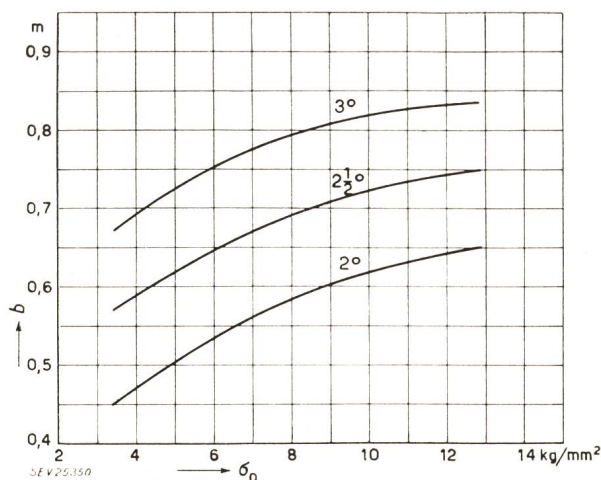


Fig. 4

Horizontale Distanz Leitungsachse—Stützpunkt  $b$  in Funktion der Zugspannung  $\sigma_0$  und des Zickzackwinkels  $\alpha_0$  als Parameter. Die Winkel sind bei den entsprechenden Kurven angegeben. Annahmen:  $s_i = 35$  m,  $l_p = 0,42$  m,  $\gamma = 8,9 \cdot 10^{-3}$  kg/m  $\cdot$  mm<sup>2</sup>

erhält schliesslich für  $b - \sigma$  und  $\alpha$  auf den Ausgangszustand bezogen —:

$$b = \sin \alpha_0 \left( \frac{s_i}{4} + \frac{\sigma_0 l_p}{\sqrt{s_i^2 \gamma^2 + \sigma_0^2 \sin^2 \alpha_0}} \right) \quad (11)$$

In Fig. 4 ist  $b = f(\sigma)$  für  $\alpha = 2^\circ, 2\frac{1}{2}^\circ, 3^\circ$ ,  $s_i = 35$  m,  $l_p = 0,42$  m und  $\gamma = 8,9 \cdot 10^{-3}$  kg/m  $\cdot$  mm<sup>2</sup> dargestellt.

### 3. Ableitung der Zustandsgleichung

#### 3.1 Allgemeine Form

Bei unter Zugspannung stehenden Leitern setzt sich bekanntlich die Längenänderung  $dl$  bei einer Temperaturänderung  $dt$  zusammen aus der thermischen Längenänderung  $dl_t$  und der elastischen Längenänderung  $dl_E$ :

$$dl = dl_t + dl_E \quad (12)$$

Die thermische Längenänderung rechnet sich zu

$$dl_t = \alpha_t l dt \quad (13)$$

Durch die Zugspannungsänderung erfolgt die elastische Längenänderung

$$dl_E = \frac{l}{E} d\sigma \quad (14)$$

In den letzten beiden Gleichungen kann, da der Fehler klein bleibt, auf der rechten Seite die Länge  $l$  durch die ideale Spannweite  $s_i$  ersetzt werden. Die Werte für  $dl_t$  und  $dl_E$  in Gl. (12) eingesetzt ergeben für  $dt$ :

$$dt = \frac{1}{\alpha_t} \left( \frac{dl}{s_i} - \frac{1}{E} d\sigma \right) \quad (15)$$

Die Bogenlänge flacher Parabeln und der Durchhang können wie folgt gerechnet werden:

$$\text{Bogenlänge } l = s \left( 1 + \frac{8}{3} \cdot \frac{f^2}{s^2} \right) \quad (16)$$

$$\text{Durchhang } f = \frac{s^2 \gamma}{8 \sigma} \quad (17)$$

Ersetzt man in Gl. (16) den linearen Faktor  $s$  durch  $s_i$ , so wird mit Gl. (17)

$$l = s_i \left( 1 + \frac{s^2 \gamma^2}{24 \sigma^2} \right) \quad (18)$$

Nach Gl. (3) war  $s$  eine Funktion von  $s_i$  und  $\alpha$ ; nach dem vorhergesagten ist  $\alpha$  selbst abhängig von  $\sigma$ ,  $s$ ,  $b$ ,  $\gamma$  und  $l_p$ . In einer festgelegten Leitungsanordnung sind ausser  $\sigma$  alle übrigen Grössen konstant; man kann daher setzen

$$s^2 = \varphi(\sigma) \quad (19)$$

und weiter

$$\frac{\gamma^2}{24 \sigma^2} \cdot \varphi(\sigma) = \psi(\sigma) \quad (20)$$

Differenziert und umgeformt lautet damit Gl. (18):

$$\frac{dl}{s_i} = \psi'(\sigma) d\sigma \quad (21)$$



Damit wird Gl. (15):

$$dt = \frac{1}{\alpha_t} \left[ \psi'(\sigma) d\sigma - \frac{1}{E} d\sigma \right] \quad (22)$$

Durch beidseitige bestimmte Integration erhält man schliesslich die Zustandsgleichung in allgemeiner Form:

$$t - t_0 = \frac{1}{\alpha_t} \left[ \psi(\sigma) \Big|_{\sigma_0}^{\sigma} - \frac{\sigma}{E} + \frac{\sigma_0}{E} \right] \quad (23)$$

### 3.2 Bestimmung der Funktion $s^2 = \varphi(\sigma)$

Aus dem System der Gleichungen (9), (6) und (3) ist  $\alpha$  zu eliminieren um vorerst die Funktion  $s^2 = \varphi(\sigma)$  mit  $s_i, b, \gamma$  und  $l_p$  als Konstanten zu erhalten. Es ist jedoch nicht möglich, daraus  $s$  explizit in der Form  $s = f(\sigma, s_i, b, \gamma, l_p)$  zu ermitteln. Würde  $s = s_i$  gesetzt — der Zickzackwinkel  $\alpha$  würde gleich 0, womit die einfach-windschiefe, in die senkrecht aufgehängte Leitung übergehen würde — ginge Gleichung (18) über in

$$l = s_i \left( 1 + \frac{s_i^2 \gamma^2}{24 \sigma^2} \right) \quad (18a)$$

und damit Gl. (15) in

$$dt = \frac{1}{\alpha_t} \left( \frac{s_i^2 \gamma^2}{12 \sigma^3} d\sigma - \frac{1}{E} d\sigma \right) \quad (15a)$$

Daraus ergibt sich durch Integration die Zustandsgleichung nach Herzog für starre oder senkrecht aufgehängte Leitungen:

$$t - t_0 = \frac{1}{\alpha_t} \left[ \frac{s_i^2 \gamma^2}{24 \sigma^2} - \frac{s_i^2 \gamma^2}{24 \sigma_0^2} - \frac{\sigma}{E} + \frac{\sigma_0}{E} \right] \quad (24)$$

Will man jedoch den Einfluss der übrigen Grössen —  $b, \gamma, l_p$  — noch erfassen, so kann  $s$  durch Näherungen bestimmt werden:

Nach Gl. (3) war

$$\cos \frac{\alpha}{2} = \frac{s_i}{s}$$

Unter Benützung bekannter goniometrischer Beziehungen wird:

$$\sin \alpha = 2 \sqrt{\left( \frac{s_i}{s} \right)^2 - \left( \frac{s_i}{s} \right)^4} \quad (25)$$

Gl. (11) lautet umgeformt:

$$\frac{2b}{s_i} = \frac{\sin \alpha}{2} + \frac{l_p \sin \alpha}{s_i \sqrt{\frac{s_i^2 \gamma^2}{4 \sigma^2} + \frac{\sin^2 \alpha}{4}}} \quad (11a)$$

Setzt man

$$\frac{s_i}{s} = 1 - \vartheta \quad (26)$$

wobei  $\vartheta$  eine sehr kleine Grösse bleiben soll, so können weiter folgende Beziehungen benützt werden:

$$\left( \frac{s_i}{s} \right)^2 \approx 1 - 2\vartheta \quad (27)$$

$$\left( \frac{s_i}{s} \right)^4 \approx 1 - 4\vartheta \quad (28)$$

und

$$s^2 \approx \frac{s_i^2}{1 - 2\vartheta} \approx s_i^2 (1 + 2\vartheta) \quad (29)$$

Mit Gl. (27)...(29) erhält man aus Gl. (11a) nach einigen Umformungen und Vereinfachungen [z. B. zweite und höhere Potenzen von  $\vartheta$  vernachlässigt] den expliziten Ausdruck für  $\vartheta$  und schliesslich für  $\psi(\sigma)$  aus Gl. (20):

$$\psi(\sigma) = \frac{s_i^2 \gamma^2}{24 \sigma^2} \left\{ 1 + 2 \left( \frac{s_i b \gamma}{2 \sigma} \right)^2 \cdot \frac{16 \sigma^2 (l_p^2 - b^2) + s_i^4 \gamma^2}{16 \sigma^2 (b^2 - l_p^2)^2 + s_i^4 \gamma^2 \left[ \frac{s_i^4 \gamma^2}{16 \sigma^2} - 2(2b^2 + l_p^2) \right]} \right\} \quad (30)$$

Einen etwas übersichtlicheren und dabei genügend genauen Ausdruck für  $\psi(\sigma)$  kann man auch folgendermassen erhalten:

Nach Gl. (3) ist

$$s^2 = \frac{s_i^2}{\cos^2 \frac{\alpha}{2}}$$

Durch Reihenentwicklung für  $\cos^2 \frac{\alpha}{2}$ , wobei die Glieder höherer Ordnung vernachlässigt werden, wird

$$s^2 \approx s_i^2 \left( 1 + \frac{\alpha^2}{4} \right) \quad (31)$$

Wird weiter in den Gl. (6) und (9)  $\frac{\alpha}{2}$  bzw.  $\sin \alpha$  durch den Winkel im Bogenmass ersetzt, kann aus Gl. (6) geschrieben werden:

$$\alpha = \frac{s_i \gamma}{\sigma} \operatorname{tg} \beta \quad (32)$$

und aus Gl. (9):

$$\sin \beta = \frac{b}{l_p} - \frac{s_i \alpha}{4 l_p} \quad (33)$$

Gl. (32) wiederum mit Hilfe einer passenden goniometrischen Beziehung umgeformt ergibt für

$$\alpha = \frac{s_i \gamma}{\sigma} \cdot \frac{\frac{b}{l_p} - \frac{s_i \alpha}{4 l_p}}{\sqrt{1 - \left( \frac{b}{l_p} - \frac{s_i \alpha}{4 l_p} \right)^2}} \approx \frac{s_i \gamma}{\sigma} \left( \frac{b}{l_p} - \frac{s_i \alpha}{4 l_p} \right) \cdot \left[ 1 + \frac{b^2}{2 l_p^2} - \frac{b s_i \alpha}{4 l_p^2} + \dots \right] \quad (34)$$

und daraus, bei Vernachlässigung Glieder höherer Ordnung von  $\alpha$ :

$$\alpha \approx \frac{s_i \gamma}{\sigma} \cdot \frac{b}{l_p} \left( 1 + \frac{b^2}{2 l_p^2} \right) \quad (35)$$

Damit wird mit Gl. (31) und Gl. (20):

$$\psi(\sigma) = \frac{s_i^2 \gamma^2}{24 \sigma^2} \cdot \left\{ 1 + \left( \frac{s_i \gamma b}{2 \sigma l_p} \right)^2 \frac{\left( 1 + \frac{b^2}{2 l_p^2} \right)^2}{\left[ 1 + \frac{s_i^2 \gamma}{4 \sigma l_p} \left( 1 + \frac{3 b^2}{2 l_p^2} \right) \right]^2} \right\} \quad (36)$$

und die Zustandsgleichung der einfach-windschiefen Fahrleitung lautet nun

$$t - t_0 = \frac{1}{\alpha_t} \left[ \frac{s_i^2 \gamma^2}{24 \sigma^2} \left\{ 1 + \left( \frac{s_i \gamma b}{2 \sigma l_p} \right)^2 \cdot \frac{\left( 1 + \frac{b^2}{2 l_p^2} \right)^2}{\left[ 1 + \frac{s_i^2 \gamma}{4 \sigma l_p} \left( 1 + \frac{3 b^2}{2 l_p^2} \right) \right]^2} \right\} \right]_{\sigma_0}^{\sigma} - \frac{\sigma}{E} + \frac{\sigma_0}{E} \quad (37)$$

#### 4. Diskussion der Zustandsgleichung

Zum Vergleich mit Gl. (37) sei in gleicher Schreibweise nochmals die Zustandsgleichung der starr oder senkrecht aufgehängten Leitung angeführt:

$$t - t_0 = \frac{1}{\alpha_t} \left\{ \frac{s_i^2 \gamma^2}{24 \sigma^2} \right\}_{\sigma_0}^{\sigma} - \frac{\sigma}{E} + \frac{\sigma_0}{E} \quad (24)$$

Der Unterschied zwischen beiden Gleichungen liegt

im, zwischen die Grenzen von  $\sigma_0$  bis  $\sigma$  gesetzten, ersten Ausdruck der grossen Klammer. In Gl. (37) werden die Brüche

$$\frac{s_i^2 \gamma^2}{24 \sigma^2} \quad \text{bzw.} \quad \frac{s_i^2 \gamma^2}{24 \sigma_0^2}$$

mit einer positiven Zahl  $> 1$  multipliziert. Bei sonst gleichen Parametern und bei gleichen obern Grenzen  $\sigma$  wird damit die Differenz  $t - t_0$  in Gl. (37) grösser als in Gl. (24). Oder mit andern Worten: Um nach beiden Gleichungen gleiche Temperaturdifferenzen zu erhalten, muss in Gl. (37)  $\sigma$  grösser sein als in Gl. (24). Somit wird bei einer Temperaturerhöhung von  $t_0$  auf  $t$  °C die Zugspannungsverminderung von  $\sigma_0$  auf  $\sigma$  bei einer einfach-windschiefen Fahrleitung geringer als bei einer starr oder senkrecht aufgehängten.

Das Absinken der Zugspannung beim Ansteigen der Temperatur wird durch die beschriebene Aufhängeart zu einem Teil kompensiert.

#### Literatur

- [1] Sachs, Karl: Elektrische Triebfahrzeuge. Bd. 2, S. 2 ff. Frauenfeld: Huber 1954.
- [2] Nibler, Heinrich: Dynamisches Verhalten von Fahrleitung und Stromabnehmer bei elektrischen Hauptbahnen. Elektr. Bahnen Bd. 21(1950), Nr. 10, S. 234...241.
- [3] Wittgenstein, Matthias: Die vollelastische Einfachfahrleitung für Trolleybus und Strassenbahn. STZ Bd. 47(1950), Nr. 51, S. 817...822.
- [4] Elektrische Anlagen und Enteignung. 4. Aufl. Hg. v. eidg. Post- und Eisenbahndepartement. S. 178...196: 12. Verordnung über die Erstellung, den Betrieb und den Unterhalt der elektrischen Einrichtungen von Bahnen. (Vom 7. Juli 1933.) Bern: 1948.

Adresse des Autors:

W. Pflanzner, Limmattalstrasse 55, Zürich 49.

## Technische Mitteilungen — Communications de nature technique

### Die Betriebssicherheit elektronischer Geräte und Anlagen

621.389.004

[Nach E. Ganz: Die Betriebssicherheit elektronischer Geräte und Anlagen. ETZ-A, Bd. 78(1957), Nr. 6, S. 218...225]

Die Betriebssicherheit von elektronischen Geräten und Anlagen darf nicht mit derjenigen z. B. eines Kraftwerkes oder Transformators verglichen werden. Diese Anlagen setzen sich aus relativ wenigen, robusten Bestandteilen zusammen, die Elektronik dagegen benötigt für ihre Geräte eine Unzahl von Bauelementen, wie Kondensatoren, Widerstände, Relais usw., nicht zuletzt aber Elektronenröhren, die wegen der Alterung die heikelsten Teile dieser Apparate sind. Ausser der geforderten guten Qualität der Bestandteile eines Gerätes sind die Umgebungs- und Einsatzbedingungen und jene der gewissenhaften Wartung für die Betriebssicherheit von höchster Bedeutung. Sind alle diese Anforderungen entsprechend den heutigen Möglichkeiten zufriedenstellend erfüllt, so können elektronische Geräte der höchsten Betriebssicherheit genügen.

Die Erkenntnis der Ursachen, die den Ausfall eines Bauteiles herbeiführen, ist von ausschlaggebender Wichtigkeit für die Betriebssicherheit, denn schon das Versagen eines einzelnen Bauelementes kann die Stilllegung des ganzen Gerätes verursachen. Eine amerikanische Untersuchung über 1135 aus elektronischen Geräten der Armee betriebsmässig ausgefallene Bauelemente führte zu folgendem Ergebnis:

Unsachgemässe Verwendung . . .	43 %
Unsachgemässe Bedienung . . .	30 %
Fabrikationsfehler . . . . .	20 %
Andere Fehler . . . . .	7 %

Aus diesen Zahlen kann der Schluss gezogen werden, dass zur Verbesserung der Betriebssicherheit vor allem die Anwendung zweckmässiger Schaltungen und Apparatekonstruktionen, welche keine Bedienungsfehler zulassen, von grosser Wichtigkeit sind.

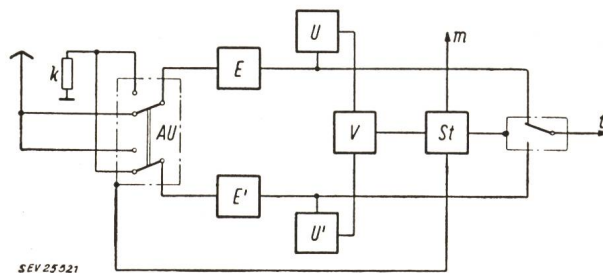


Fig. 1

#### Prinzipschema einer selbsttätig umschaltbaren Empfangsstation einer Hochfrequenz-Richtfunkanlage

Wenn der Empfänger E schadhaft wird, schaltet der Antennenumschalter AU, gesteuert durch die Überwachungseinheit U bzw. die Steuereinheit St selbsttätig auf den Reserveempfänger E' um.

k Antennen-Ankopplung

Weitere Erläuterungen im Text

Bei der Armee werden die elektronischen Apparate naturgemäss durch nur angelerntes Personal bedient und auch bedeutend grober behandelt als dies z. B. bei Luftfahrtgesellschaften der Fall ist. Die Statistik von Betrieben, bei welchen, im Gegensatz zur Armee, Fachleute die Apparate be-