

**Zeitschrift:** Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins

**Herausgeber:** Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke

**Band:** 36 (1945)

**Heft:** 5

**Artikel:** Die Schnellhöhe von Seilen und Drähten beim Abfallen von Zusatzlasten

**Autor:** Hunziker, G.

**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-1060205>

#### **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:** 16.02.2026

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

## Die Schnellhöhe von Seilen und Drähten beim Abfallen von Zusatzlasten<sup>1)</sup>

Von G. Hunziker, Baden

621.315.1.056.1

Es wird ein analytisches Verfahren zur Berechnung der Schnellhöhe von gespannten Seilen und Drähten nach dem Abfallen von Zusatzlasten für Spannweiten bis rund 1500 m erläutert. Schnellhöhen aller grösseren Spannweiten lassen sich mit einem graphischen Verfahren, das beschrieben ist, ermitteln.

Beide Methoden haben zur Voraussetzung, dass die Belastung homogen und über den Leiter gleichmässig verteilt sei, dass die Zusatzlast am ganzen Leiter im gleichen Zeitmoment abfällt, dass Seilsteifigkeit und Luftwiderstand sowie der Einfluss von Nachbarspannweiten vernachlässigbar seien.

Die entwickelten Verfahren sind gültig für sehr stark und sehr schwach gespannte, schwere und leichte Seile und wurden auf ihre Brauchbarkeit und Genauigkeit hin mittels Versuchen an Freileitungsmodellen überprüft. Die Uebereinstimmung zwischen den Ergebnissen der Rechnung und den Versuchsresultaten war durchaus befriedigend, wie auch aus berechneten und gemessenen Weg-Zeit-Funktionen eines hochschnellenden Modelleiters hervorgeht.

Sobald Probleme im Leitungsbau oder im Seilbahnbau auftreten, bei welchen die formulierten Voraussetzungen nicht mehr zutreffen, sind die Aufgaben der Rechnung nicht mehr oder nur noch teilweise zugänglich. Sie lassen sich jedoch in zweckdienlicher Weise an Modellen überprüfen, die bei der Motor-Columbus A.G. in Baden entwickelt und im Bulletin SEV 1942, Nr. 9, S. 242, kurz beschrieben wurden.

### 1. Einleitung

Ein gespanntes Seil, das durch Rauhreif-, Schnee- oder Eisbehang elastisch gedehnt ist, schnellt nach dem Abfallen dieser Zusatzlast in die Höhe. Insbesondere bei Kraftübertragungsleitungen mit Seilen, die übereinander angeordnet sind, kann das Hochschnellen zum Zusammenschlagen einzelner Leiter und damit zu Betriebsstörungen führen. Es besteht daher das Bedürfnis, die Schnellhöhe von Seilen und Drähten nach dem Lastabwurf bestimmen zu können, um sich die Unterlagen für die geeignete Wahl der Leiterabstände und des Mastbildes zu beschaffen, damit Störungen infolge Zusammenschlagens der Leiter nach Möglichkeit vermieden werden. Besonders heute interessiert dieses Problem, da infolge des Kupfermangels in der Industrie gegenwärtig verschiedenenorts die Frage geprüft wird, unter welchen Bedingungen die in den Nieder- und Mittelspannungsnetzen verlegten Kupferleiter durch solche aus Leichtmetall ersetzt werden könnten.

In der Literatur<sup>2)</sup> finden sich vereinzelte Teillösungen des Problems. Sie können jedoch nicht durchweg befriedigen, weil sie nur unter bestimmten Voraussetzungen für gewisse Fälle und innerhalb relativ enger Grenzen verwendbar sind.

Es wurde daher der Versuch unternommen, die Schnellhöhe für beliebige Punkte von Seilen und Drähten und für unbeschränkt grosse, gerade und schiefe Spannweiten zu bestimmen. Es gelang, die

Exposé d'une méthode analytique permettant de calculer la hauteur de rebondissement lors du détachement de charges additionnelles, pour des fils massifs ou câblés de portées jusqu'à environ 1500 m. Pour les portées plus grandes, la hauteur de rebondissement peut être déterminée par une méthode graphique.

Ces deux méthodes ne s'appliquent qu'au cas où la charge est homogène et répartie uniformément sur le conducteur, où la charge additionnelle de tout le conducteur se détache au même moment et où la rigidité des fils câblés et la résistance de l'air, ainsi que l'effet des portées voisines sont négligeables.

Ces méthodes sont valables pour des fils très fortement ou très faiblement tendus et pour des fils câblés lourds ou légers. Leur utilisation et leur précision ont été contrôlées par des essais sur des modèles mécaniques de lignes aériennes. La concordance entre les résultats des calculs et ceux des essais a été très satisfaisante, ainsi que le prouvent également les fonctions chemin-temps calculées et mesurées pour un modèle de conducteur rebondissant.

Dès qu'il s'agit de problèmes concernant la construction de lignes électriques aériennes ou de funiculaires, où les hypothèses ci-dessus n'entrent plus en ligne de compte, il n'est guère possible de les résoudre par le calcul. On peut toutefois les étudier sur des modèles mécaniques, qui ont été mis au point par la S. A. Motor-Columbus à Baden et décrits brièvement dans le Bulletin ASE 1942, No. 9, p. 242.

erforderlichen Gleichungen für die Schnellhöhe von Seilen zwischen zwei Aspannpunkten abzuleiten, wenn die gleichmässig verteilte Zusatzlast am ganzen Seil im gleichen Zeitpunkt abfällt. Dabei wurden Seilreibung und Luftwiderstand vernachlässigt. Die Berechnung der Schnellhöhe erfasst jene höchste Lage, die das zwischen zwei starren Punkten gespannte Seil unmittelbar nach dem Abwurf der Zusatzlast einnimmt.

### 2. Das Hochschnellen von gespannten Seilen und Drähten

Ein gewichtloses Seil (Draht) ohne Steifigkeit, das zwischen zwei Punkten aufgehängt und das länger als der Abstand der Aufhängepunkte ist, kann unter dem Einfluss von irgendwelchen Kräften jede beliebige Form zwischen den Aufhängepunkten annehmen. Denkt man sich das gewichtlose Seil dehnbar und sukzessive durch gleichmässig über die ganze Seillänge verteilte vertikale Gewichte belastet, so nimmt es beim Auftreten der kleinsten Belastung Kettenlinienform an, wobei eine Grenzlage auftritt, bei welcher die Kurvenform eine Kettenlinie ist, die Belastung und die Seilspannung dagegen noch Null sind. Bei zunehmender Belastung dehnt sich das Seil elastisch unter dem Einfluss der durch die Gewichte hervorgerufenen Seilspannung, wodurch sich der Durchhang naturgemäß vergrössert. Die erwähnte Belastung bestehe aus dem Eigengewicht des Seiles und einer gleichmässig verteilten, homogenen Zusatzlast.

Fällt die Zusatzlast plötzlich ab, so zieht sich das Seil wieder zusammen. Dabei wird es unter dem Einfluss der frei werdenden elastischen Kräfte so weit emporgeschleudert, bis die im gedehnten Seil aufgespeicherte Energie aufgezehrt

1) Auszug aus der Publikation des Verfassers: «Theorie gespannter Seile, Schnellhöhe und Modellmechanik», Verlag Gebr. Leemann & Co., Zürich/Leipzig, 1942.

2) Z. B. Elektrizitätswirtschaft 1934, S. 491, Gröbl: Planung und Bau von Freileitungen; ETZ 1942, S. 61, Heft 5/6, Berechnung der Schnellhöhe von Freileitungen von F. Haberland.

ist. Das Seil schwingt hierauf um die Ruhelage des unbelasteten Zustandes. Als *Schnellhöhe* des Seiles wird diejenige maximale Höhe bezeichnet, die die emporschneidenden Seilteile unmittelbar nach dem Abfallen der Zusatzlast erreichen.

Die elastischen Kräfte, die das Emporschleudern des Seiles bewirken, sind im Moment des Abfallens der Zusatzlast, also zu Beginn der Bewegung, ein Maximum. Die Grösse der elastischen Kräfte ist von der abfallenden Zusatzlast abhängig, welche somit für ein gegebenes gespanntes Seil dessen Schnellhöhe bestimmt.

Der Raum, den das Seil vom Beginn der Bewegung an bis zur Erreichung der Schnellhöhe durchlaufen kann, lässt sich unter der Voraussetzung, dass die Seillänge grösser als der Abstand der Aufhängepunkte ist, in folgende Gebiete unterteilen:

a) Das *unterhalb* der Sehne liegende Gebiet der *elastischen Dehnung*. Es liegt zwischen der oben definierten Grenzlage und der Seilkurve im belasteten Zustand.

b) Das *dehnungsfreie Gebiet*. Es befindet sich zwischen der unteren und oberen Grenzlage. Die obere Grenzlage ergibt sich, wenn das Seil durch gleichmässig verteilte, vertikal nach oben wirkende Kräfte soweit gehoben wird, dass es Kettenlinienform annimmt, aber noch keine Dehnung erfährt. Die obere Grenzlage liegt also in bezug auf die Mitte der Sehne symmetrisch zur unteren Grenzlage. Das dehnungsfreie Gebiet ist dadurch gekennzeichnet, dass das Seil zwischen den beiden Grenzlagen nicht mehr Kettenlinienform besitzt. Die Kurvenform ist durch die Geschwindigkeiten gegeben, mit welchen die einzelnen Seilteile die untere Grenzlage durchlaufen. In diesem Gebiet erfolgt die Seilbewegung nach den Gesetzen des freien Wurfs.

c) Das *oberhalb* der Sehne liegende Gebiet der *elastischen Dehnung*. Es liegt oberhalb der oberen Grenzlage und ist dadurch gekennzeichnet, dass das Seil in diesem Gebiet — gleichmässig verteilte, nach oben wirkende Kräfte vorausgesetzt — denselben Gesetzen gehorcht und infolgedessen in erster Annäherung dieselbe Kurvenform annimmt, wie im elastischen Gebiet unterhalb der Sehne. Die Seilkurven sind in diesem Gebiet naturgemäss nach unten konkav.

Ist die Seillänge *kleiner* als der Abstand der Aufhängepunkte, so existiert kein dehnungsfreies Gebiet. Das untere und das obere Gebiet der elastischen Dehnung besitzen in der Sehne die gemeinsame Grenzlinie.

Die Schnellhöhe-Berechnung wird auf Grund folgender Annahmen durchgeführt:

a) Das Seil ist an zwei beliebigen starren Aufhängepunkten vollständig gelenkig befestigt.

b) Seilstifigkeit, Seilreibung, Torsionsfestigkeit, Luftwiderstand und seitlicher Winddruck werden vernachlässigt.

c) Die Zusatzlast ist homogen und gleichmässig über das ganze Seil verteilt und kann keine Zugspannungen aufnehmen. Sie fällt am ganzen Seil im gleichen Moment ab.

d) Der Einfluss von Seilteilen, die unter Umständen schon zurückfallen, bevor die benachbarten Teile ihre maximale Höhe erreicht haben, wird nicht berücksichtigt.

Es zeigt sich, dass die Schnellhöhen für Spannweiten bis 1500 m und mit beliebigen Sehnenneigungen analytisch berechnet werden können, während für grössere Spannweiten ein graphisches Verfahren die gesuchten Grössen vermittelt. Die Kettenlinie und die physikalisch richtige Kurvenform (elastische Linie) ergeben für sehr grosse Spannweiten derart unübersichtliche Gleichungen,

dass eine analytische Auswertung für die Praxis nicht mehr zweckdienlich ist. Das graphische Verfahren liefert die Resultate in einfacherer Weise mit genügender Genauigkeit.

### 3. Bezeichnungen

<i>a</i>	Spannweite, Horizontaldistanz der Aufhängepunkte in cm
<i>h</i>	Höhdifferenz der Aufhängepunkte in cm
<i>ψ</i>	Winkel zwischen Sehne und Horizontale
<i>f<sub>1</sub></i>	Durchhang des belasteten Seils in cm
<i>f<sub>0</sub></i>	Durchhang des unbelasteten Seils in cm
<i>f</i>	Durchhang in cm des hochschnellenden Seiles zur Zeit <i>t</i>
<i>f<sub>00</sub></i>	Durchhang der unteren Grenzlage in cm
<i>η</i>	Schnellweg in cm zur Zeit <i>t</i> , vom belasteten Seil aus in positivem Sinne gemessen
<i>η<sub>00</sub></i>	Schnellweg bis zur unteren Grenzlage ( $\eta_{00} = f_1 - f_{00}$ )
$\eta_s = \eta_{tot}$	Schnellhöhe des hochgeschneideten Seils (cm)
Index '	bezieht sich bei den Seillängen und Durchhängen auf die schiefe Spannweite
Index <i>x</i>	bezieht sich auf die Stelle <i>x</i> von der <i>y</i> -Achse entfernt
<i>P<sub>0</sub></i>	Scheitelspannung in kg/cm <sup>2</sup> im unbelasteten Zustand
<i>P<sub>1</sub></i>	Scheitelspannung in kg/cm <sup>2</sup> im belasteten Zustand
<i>P<sub>00</sub></i>	Scheitelspannung in kg/cm <sup>2</sup> in der Grenzlage
	$p_{00} = 0$ , wenn $l_{00} \geq a$
<i>q</i>	Leiterquerschnitt in cm <sup>2</sup>
<i>z</i>	Gewicht der Zusatzlast in kg/m ungedehnter Seillänge
<i>ζ</i>	Gewicht der Zusatzlast pro cm ungedehnter Seillänge und pro cm <sup>2</sup> Seilquerschnitt (in kg/cm <sup>3</sup> )
$\ddot{\eta}, \ddot{\eta}_x$	Beschleunigung des Seipunktes im Abstand <i>x</i> = 0 bzw. <i>x</i> = <i>x</i> in Richtung des positiven Schnellweges $\eta, \eta_x$
<i>v, v<sub>x</sub></i>	Geschwindigkeit der emporschneidenden Seilteile
<i>v<sub>00</sub>, v<sub>00x</sub></i>	Geschwindigkeit, mit welcher die Seilteile an der Stelle <i>x</i> = 0 bzw. <i>x</i> = <i>x</i> die Grenzlage durchlaufen
<i>γ<sub>00</sub></i>	Eigengewicht des Leiters (Seiles oder Drahtes) pro cm ungedehnter Seillänge und pro cm <sup>2</sup> Seilquerschnitt (Dimension aller <i>γ</i> -Werte ist kg/cm <sup>3</sup> )
<i>γ<sub>10</sub></i>	Gewicht des belasteten Leiters pro cm Seillänge und pro cm <sup>2</sup> Seilquerschnitt
<i>γ<sub>00G</sub></i>	Gewicht des hochschnellenden Seiles in der Grenzlage; $\gamma_{00G} = 0$ , wenn $l_{00} \geq a$
<i>m</i>	Masse von 1 cm ungedehntem Seil von <i>q</i> cm <sup>2</sup> Querschnitt
<i>γ</i>	ist die auf 1 cm <sup>3</sup> Seil in Richtung von $\eta_x$ wirkende resultierende elastische Kraft zur Zeit <i>t</i> , welche das Seil stets in Richtung seiner Ruhelage im unbelasteten Zustand zurückzieht und demnach die Schnellbewegung verursacht. <i>γ</i> entspricht somit der Rückstellkraft einer Feder, die um den Betrag $f'_x - f'_{0x}$ aus ihrer Ruhelage ausgelenkt und deren Masse (d. h. die federnde Seilmasse) am ausgelenkten Federende konzentriert gedacht ist. Auf Grund dieser Definition und der für eine Feder gültigen Differentialgleichung schreibt sich <i>γ</i> demnach zu
	$\gamma = \gamma_{00} + \frac{m}{q} \ddot{\eta}_x$
	$\frac{m}{q} \ddot{\eta}_x$ ist die d'Alembertsche Trägheitskraft
	In die Vorstellungswelt des Leitungsbauers mag die folgende Definition passen:
	<i>γ</i> ist das fiktive Gewicht von 1 cm <sup>3</sup> Seil während des Schnellvorganges, das der jeweiligen Seillage des hochschnellenden Seils zur Zeit <i>t</i> entspricht. <i>γ</i> setzt sich somit beim emporgesleuderten Leiter zusammen aus dem Eigengewicht <i>γ<sub>00</sub></i> und der Trägheitskraft $\frac{m}{q} \ddot{\eta}_x$ von 1 cm <sup>3</sup> Seil in der Beschleunigungsrichtung. Eine Zusatzlast von der Grösse der Trägheitskraft bewirkt, dass das Seil in der Lage, in der es sich zur Zeit <i>t</i> befindet, verharrt. ungedehnte Seillänge in cm

$l_0$	Seillänge im Zustand ohne Zusatzlast in cm
$l_1$	Seillänge im Zustand mit Zusatzlast in cm
$g$	Erdbeschleunigung in $\text{cm/s}^2$
$E$	Elastizitätsmodul des Seils oder Drahts in $\text{kg/cm}^2$

#### 4. Berechnung der Schnellhöhe für Spannweiten bis 1500 m und mit beliebigen Sehnenneigungen

Das Gewicht  $dV$  des Seilelementes  $dl$ , das den Querschnitt  $q$  besitzt, ist (vergl. Fig. 1)

$$dV = \gamma_{10} q dl = (\gamma_{00} + \zeta) q dl$$

weil  $\zeta = \frac{z}{100 q}$  ist.

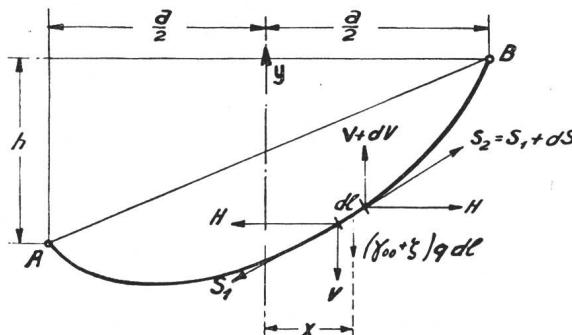


Fig. 1.

Die abgeworfene Zusatzlast  $\zeta$  ist im Zeitmoment  $t = 0$  gleich der d'Alembertschen Trägheitskraft

$$\zeta = \frac{m}{q} \ddot{\eta}_x \quad (\text{für } t = 0) \quad (1)$$

Die Bewegungsgleichung für einen Seilpunkt im Abstand  $x$  von der y-Achse lautet

$$\gamma = \gamma_{00} + \frac{m}{q} \ddot{\eta}_x \quad (2)$$

Weil  $m = \frac{\gamma_{00} q}{g}$  ist, geht Gl. (2) über in

$$\gamma = \gamma_{00} \cdot \left( \frac{g + \ddot{\eta}_x}{g} \right) = \gamma_{00} \cdot \left( 1 + \frac{\ddot{\eta}_x}{g} \right) \quad (3)$$

##### a) Die Bestimmung der Schnellhöhe im elastischen Gebiet unterhalb der Sehne

Der Schnellweg  $\eta_x$  schreibt sich unter Berücksichtigung der bekannten Durchhangsformeln

$$\eta_x = f'_{1x} - f'_x = \frac{a^2 - 4x^2}{8 \cos \psi} \left( \frac{\gamma_{10}}{p_1} - \frac{\gamma}{p} \right) \quad (4)$$

Für  $\gamma$  den Wert gemäss Gl. (3) eingesetzt und nach  $p$  aufgelöst, ergibt

$$p = \frac{(a^2 - 4x^2) p_1 \gamma_{00} (g + \ddot{\eta}_x)}{(a^2 - 4x^2) \gamma_{10} g - 8g \cos \psi p_1 \eta_x} \quad (5)$$

Die Zustandsgleichung liefert den Zusammenhang zwischen den Werten  $p$  und  $\gamma$ , die im vorliegenden Fall definitionsgemäss Momentanwerte zur Zeit  $t$  darstellen. Als Anfangszustand wird das belastete Seil angenommen. In der Originalarbeit wird ge-

zeigt, dass sich die Zustandsgleichung für schiefe Spannweiten und für konstante Temperaturen schreiben lässt:

$$\frac{\gamma}{p} = \sqrt{\frac{p + d'}{b'}} \quad (6)$$

$$\text{wobei } d' = \frac{\gamma_{10}^2 a^2 E \cos \psi}{24 p_1^2} - p_1$$

$$b' = \frac{a^2 E \cos \psi}{24}$$

Gl. (6) in Gl. (4) eingesetzt, ergibt unter Benützung von Gl. (5) nach einigen Umformungen

$$\ddot{\eta}_x = a_1 \eta_x^3 + a_2 \eta_x^2 + a_3 \eta_x + a_4 \quad (7)$$

Die Konstanten in Gl. (7) bedeuten:

$$a_1 = -\frac{64 \cos^4 \psi g E}{3 \gamma_{00}} \cdot \frac{a^2}{(a^2 - 4x^2)^3}$$

$$a_2 = \frac{8 \cos^3 \psi g E \gamma_{10}}{\gamma_{00} p_1} \cdot \frac{a^2}{(a^2 - 4x^2)^2}$$

$$a_3 = -\left[ \frac{2}{3} \cdot \frac{\cos^2 \psi g E \gamma_{10}^2}{\gamma_{00} p_1^2} \cdot \frac{a^2}{(a^2 - 4x^2)^3} + \frac{8 \cos \psi g p_1}{\gamma_{00} (a^2 - 4x^2)} \right]$$

$$a_4 = g \left( \frac{\gamma_{10}}{\gamma_{00}} - 1 \right)$$

Gl. (7) stellt die Differentialgleichung des empor-schnellenden Seiles dar. Sie lässt sich unter Einführung der Seilgeschwindigkeit

$$v_x = \frac{d\eta_x}{dt}$$

wie folgt integrieren:

$$\int \ddot{\eta}_x d\eta_x = \frac{v_x^2}{2} + c_1, \text{ so dass Gl. (7) übergeht in}$$

$$\frac{v_x^2}{2} = \frac{a_1}{4} \eta_x^4 + \frac{a_2}{3} \eta_x^3 + \frac{a_3}{2} \eta_x^2 + a_4 \eta_x + c_1 \quad (7a)$$

$c_1 = 0$ , weil  $v_x$  im Moment des Abfallens der Zusatzlast und bei Erreichen der Schnellhöhe  $\eta_{sx}$  ebenfalls gleich 0 ist.

Die Gleichung der Schnellhöhe für das untere elastische Gebiet lautet daher:

$$\eta_{sx}^3 + \frac{4}{3} \cdot \frac{a_2}{a_1} \eta_{sx}^2 + 2 \frac{a_3}{a_1} \eta_{sx} + \frac{4 a_4}{a_1} = 0$$

Unter Verwendung der Durchhangsformeln und der Werte für die Konstanten  $a_1 \dots a_4$  ergibt sich die Schnellhöhe einer schießen Spannweite an der Stelle  $x$  aus der Gleichung

$$\eta_{sx}^3 - 4f'_{1x} \eta_{sx}^2 + \left[ 4f'_{1x}^2 + \frac{3}{4} \cdot \frac{p_1 (a^2 - 4x^2)^2}{a^2 E \cos^3 \psi} \right] \eta_{sx} - \frac{3}{16} \cdot \frac{(a^2 - 4x^2)^3 (\gamma_{10} - \gamma_{00})}{a^2 E \cos^4 \psi} = 0 \quad (8)$$

Die Schnellhöhe für den Punkt mit maximalem Durchhang (für  $x = 0$ ) berechnet sich aus der Gleichung

$$\eta_s^3 - 4f_1' \eta_s^2 + \left[ 4f_1'^2 + \frac{3}{4} \frac{p_1 a^2}{E \cos^3 \psi} \right] \eta_s - \frac{3}{16} \cdot \frac{a^4 (\gamma_{10} - \gamma_{00})}{E \cos^4 \psi} = 0 \quad (9)$$

Für den Scheitelpunkt der horizontalen Spannweiten ergibt sich die Schnellhöhe aus der Gleichung

$$\eta_{sx}^3 - 4f_{1x} \eta_{sx}^2 + \left[ 4f_{1x}^2 + \frac{3}{4} \cdot \frac{p_1 a^2}{E} \right] \eta_{sx} - \frac{3}{16} \cdot \frac{a^4 (\gamma_{10} - \gamma_{00})}{E} = 0 \quad (10)$$

und für einen beliebigen Punkt der horizontalen Spannweite:

$$\eta_{sx}^3 - 4f_{1x} \eta_{sx}^2 + \left[ 4f_{1x}^2 + \frac{3}{4} \cdot \frac{p_1 (a^2 - 4x^2)^2}{a^2 E} \right] \eta_{sx} - \frac{3}{16} \cdot \frac{(a^2 - 4x^2)^3 (\gamma_{10} - \gamma_{00})}{a^2 E} = 0 \quad (10a)$$

b) Die Bestimmung der Schnellhöhe im dehnungsfreien Gebiet

Wenn mit  $v_{00x}$  die Geschwindigkeit bezeichnet ist, mit welcher das Seil an der Stelle  $x$  die Grenzlage durchläuft, so berechnet sich die Schnellhöhe  $\eta_{wx}$ , die das Seilteilchen an der Stelle  $x$  von der Grenzlage an erreicht, zu

$$\eta_{wx} = \frac{v_{00x}^2}{2g}$$

wo  $\eta_{wx}$  den Schnellweg im dehnungsfreien Gebiet bedeutet. Die Grenzlage ist gegeben durch die Durchhangsdifferenz

$$f_{1x}' - f_{00x}' = \eta_{00x} = \left( \frac{a^2 - 4x^2}{8 \cos \psi} \right) \left( \frac{\gamma_{10} - \gamma_{00G}}{p_1 - p_{00}} \right) \quad (11)$$

Definitionsgemäß gilt für die Grenzlage

$$\frac{\gamma_{00G}}{p_{00}} = \frac{0}{0}$$

Aus der Zustandsgleichung (6) folgt aber für  $p_{00} = 0$  und  $\gamma_{00G} = 0$ :

$$\frac{\gamma_{00G}}{p_{00}} = \sqrt{\frac{d'}{b'}}$$

so dass Gl. (11) unter Berücksichtigung der Werte für  $d'$  und  $b'$  übergeht in

$$\eta_{00x} = f_{1x}' - \sqrt{f_{1x}'^2 - \frac{3}{8} \frac{(a^2 - 4x^2)^2 p_1}{a^2 E \cos^3 \psi}} \quad (12)$$

Die Schnellhöhe  $\eta_{totx}$  im dehnungsfreien Gebiet an der Stelle  $x$  ergibt sich aus der Summe der Teilwege

$$\eta_{totx} = \eta_{00x} + \eta_{wx} = \eta_{00x} + \frac{v_{00x}^2}{2g} \quad (13)$$

Aus Gl. (7a) ergibt sich der Ausdruck für  $\frac{v_{00x}^2}{2g}$ , so dass Gl. (13) übergeht in

$$\eta_{totx} = \frac{a_1}{4g} \eta_{00x}^4 + \frac{a_2}{3g} \eta_{00x}^3 + \frac{a_3}{2g} \eta_{00x}^2 + \left( \frac{a_4}{g} + 1 \right) \eta_{00x} \quad (14)$$

Unter Berücksichtigung der Werte für die Konstanten  $a_1, \dots, a_4$  und durch zahlreiche Umformungen und Zusammenfassungen ergeben sich aus Gl. (14) die Formeln für die Schnellhöhe im dehnungsfreien Gebiet zu:

Für schiefe Spannweiten an der Stelle  $x$ :

$$\eta_{totx} = \frac{3}{4} \frac{(a^2 - 4x^2) p_1^2}{a^2 \gamma_{00} E \cos^2 \psi} \quad (15)$$

Für schiefe Spannweiten an der Stelle  $x = 0$  (Spannweitenmitte)

$$\eta_{tot} = \frac{3}{4} \frac{p_1^2}{\gamma_{00} E \cos^2 \psi} \quad (16)$$

Für gerade Spannweiten an der Stelle  $x$ :

$$\eta_{totx} = \frac{3}{4} \frac{(a^2 - 4x^2) p_1^2}{a^2 \gamma_{00} E} \quad (17)$$

Für gerade Spannweiten an der Stelle  $x = 0$  (Scheitelpunkt)

$$\eta_{tot} = \frac{3}{4} \frac{p_1^2}{\gamma_{00} E} \quad (18)$$

c) Die Bestimmung der Schnellhöhe im elastischen Gebiet oberhalb der Sehne

Es lässt sich zeigen, dass sich die Schnellhöhe im elastischen Gebiet oberhalb der Sehne aus denselben Gleichungen (Nr. 8, 9, 10 und 10a) berechnen lässt wie die Schnellhöhe im elastischen Gebiet unterhalb der Sehne. Der Schnellvorgang dürfte sich etwa so abspielen, dass zunächst die Seilteile der Spannweitenmitte die obere Grenzlage durchlaufen, dass hierauf sukzessive die nächstfolgenden benachbarten Seilteile die obere Grenzlage ebenfalls durchlaufen, wodurch die Ausbuchtungen des Seils infolge der wiederkehrenden Seilspannung verschwinden und das Seil sich zu dehnen beginnt. Zahlreiche Modellversuche<sup>3)</sup> bestätigen, dass die Annäherung, wonach sich das Seil im oberen elastischen Gebiet unter dem Einfluss von gleichmäßig über die Seillänge verteilten vertikalen Kräften dehnt und demzufolge Ketten-

<sup>3)</sup> Vgl. die in der Fussnote<sup>1)</sup> erwähnte Publikation sowie Bulletin SEV 1942, Nr. 9, S. 242.

linienform annimmt, zu durchaus brauchbaren Resultaten der analytischen Berechnung im oberen elastischen Gebiet mit Hilfe derselben Gleichungen führt, die für das untere elastische Gebiet Gültigkeit haben.

*d) Die Bestimmung der Schnellhöhe,  
wenn kein dehnungsfreies Gebiet existiert*

Wenn die Seillänge gleich oder kleiner als der Abstand der Aufhängepunkte ist, wenn also kein dehnungsfreies Gebiet existiert, berechnet sich die Schnellhöhe ebenfalls nach denselben Gleichungen wie für das untere elastische Gebiet bei der Existenz eines dehnungsfreien Gebietes.

### 5. Kriterien

mittels welcher Gleichung die Schnellhöhe für ein gegebenes, belastetes Seil zu berechnen ist.

*a) Die Existenz des dehnungsfreien Gebietes*

Es existiert ein dehnungsfreies Gebiet, wenn

$$f'_{00} > 0$$

oder  $\eta_{00} < f_1'$

Unter Berücksichtigung von Gl. (12) kann demnach die Bedingung für die Existenz des dehnungsfreien Gebietes wie folgt geschrieben werden:

$$f_1'^2 > \frac{3}{8} \frac{a^2 p_1}{E \cos^3 \psi} \quad (19)$$

Wird mit  $p_1^*$  diejenige Seilspannung am Scheitel des belasteten Seils bezeichnet, die sich ergibt, wenn die ungedehnte Seillänge  $l'_{00}$  gleich ist der Distanz der Aufhängepunkte, also  $l'_{00} = \frac{a}{\cos \psi}$ , so schreibt sich der Durchhang des belasteten Seiles zu

$$f_1^* = \frac{a^2 \gamma_{10}}{8 p_1^* \cos \psi} \quad (20)$$

Gl. (20) in (19) eingesetzt und nach  $p_1^*$  aufgelöst, ergibt

$$p_1^* = \sqrt[3]{\frac{E a^2 \gamma_{10}^2 \cos \psi}{24}} \quad (21)$$

Für das unbelastete Seil gilt analog

$$p_0^* = \sqrt[3]{\frac{E a^2 \gamma_{00}^2 \cos \psi}{24}} \quad (22)$$

Die Existenz des dehnungsfreien Gebietes lässt sich somit durch Vergleich der in einem gegebenen Seil vorhandenen Montage-(Scheitel-)Spannung  $p_0$  mit dem aus Gl. (22) ermittelten kritischen Wert  $p_0^*$  nachweisen. Das Kriterium für die Existenz des dehnungsfreien Gebietes lautet

wenn  $p_0 \geq p_0^*$  existiert kein dehnungsfreies Gebiet  
wenn  $p_0 < p_0^*$  existiert ein dehnungsfreies Gebiet.

*b) Kriterium für die Schnellhöhe,  
falls ein dehnungsfreies Gebiet existiert*

Falls ein dehnungsfreies Gebiet existiert, liegt die Schnellhöhe entweder im unteren, im oberen elastischen Gebiet oder zwischen den beiden Grenzlagen.

Ohne an dieser Stelle auf die Beweisführung und auf die Ableitungen einzutreten, sei hier lediglich das Resultat der Untersuchung festgehalten. Durch Kombination der Zustandsgleichungen mit den Formeln für die Schnellhöhe lässt sich nach einigen Umformungen folgende «Kriteriumsgleichung» geben:

$$p^{*6} - \frac{4}{3} e p^{*3} + \left( \frac{8}{3} e p_0 - \frac{e^2}{9 p_0^2} \right) p^{*2} + \frac{4}{9} e^2 = 0 \quad (23)$$

Hierin bedeutet  $e = a^2 E \gamma_{00}^2 \cos \psi$

Gl. (23) besitzt beim Vorhandensein eines dehnungsfreien Gebietes zwei positive reelle Wurzeln  $p_2^*$  und  $p_3^*$ , welche gleichzeitig auch die Gleichung (24)

$$p^{*2} = \frac{4 E \gamma_{00} \cos^2 \psi}{3} \left[ \frac{a^2}{8 \cos \psi} \sqrt{\frac{p^* + d'}{b'}} \pm \sqrt{\frac{a^4}{64 \cos^2 \psi} \left( \frac{p^* + d'}{b'} \right) - \frac{3}{8} \frac{a^2 p^*}{E \cos^3 \psi}} \right] \quad (24)$$

erfüllen müssen. Die Werte für  $d'$  und  $b'$  sind in Gl. (6) angegeben.  $p_2^*$  bedeutet die Scheitelpfung des belasteten Seils, das nach Lastabwurf die untere Grenzlage erreicht,  $p_3^*$  ergibt die Schnellhöhe bis zur oberen Grenzlage.

Besitzt das zu untersuchende Seil (oder der Draht) im belasteten Zustand die Scheitelpfung  $p_1$ , so lautet das Kriterium für die Schnellhöhe wie folgt:

Wenn  $p_1 < p_2^*$ : Die Schnellhöhe liegt im elastischen Gebiet unterhalb der Sehne. Berechnung nach Gl. 8, 9, 10 oder 10a.

Wenn  $p_2^* < p_1 < p_3^*$ : Die Schnellhöhe liegt im dehnungsfreien Gebiet. Berechnung nach Gl. 15, 16, 17 oder 18.

Wenn  $p_1 > p_3^*$ : Die Schnellhöhe liegt im elastischen Gebiet oberhalb der Sehne. Berechnung nach Gl. 8, 9, 10 oder 10a.

Es lässt sich ein *approximatives* Kriterium für die Beurteilung der Berechnungsart der Schnellhöhe aufstellen; was die Einzelheiten der Ableitung anbetrifft, sei auf die Originalarbeit verwiesen. Im folgenden werden nur die Resultate festgehalten:

Zunächst wird wieder mit Hilfe der Gl. (22) geprüft, ob ein dehnungsfreies Gebiet existiert. Im bejahenden Fall wird die kritische Spannweite  $a^*$  berechnet, die sich aus der Montagespannung  $p_0$  und den übrigen Leitungsdaten gemäß Gl. (25) errechnen lässt. Bei der kritischen Spannweite  $a^*$  ist das ungedehnte Seil gleich lang wie die Distanz der Aufhängepunkte und weist am Scheitel die gegebene Spannung  $p_0$  auf.

$$a^* = \sqrt{\frac{24 p_0^3}{E \gamma_{00}^2 \cos \psi}} \quad (25)$$

Wenn nun die zu untersuchende Spannweite  $a > 2 a^*$ , lässt sich über die Schnellhöhe folgendes aussagen:

Wenn  $p_1 < 2 p_0$ : { Die Schnellhöhe liegt im unteren elastischen Gebiet.

Wenn  $p_1 > 2 p_0$  } Die Schnellhöhe liegt im dehnungsfreien und  $p_1 < 6 p_0$  } Gebiet.

Wenn  $p_1 > 6 p_0$ : { Die Schnellhöhe liegt im oberen elastischen Gebiet.

Diese approximativen Kriteriumsregeln sind für alle Seilmaterialien gültig und von der Sehnenneigung unabhängig.

## 6. Gültigkeitsbereich der Schnellhöheformeln

Die eingehende Ueberprüfung der Schnellhöheberechnungen mittels Modellversuchen ergab, dass die Formeln für Spannweiten bis 1500 m und bei Zusatzlasten von 3...4fachem Leitergewicht brauchbare und genügend genaue Resultate liefern.

Für den Gültigkeitsbereich und den Genauigkeitsgrad der Schnellhöheformeln ist die Verwendung möglichst genauer Werte für die Scheitelpressungen  $p_1$  massgebend. Die Verwendung der geeigneten Zustandsgleichung zur Ermittlung der  $p_1$ -Werte ist daher für den Genauigkeitsgrad von besonderer Wichtigkeit.

eidgenössischen Vorschriften für die Dimensionierung von Uebertragungsanlagen massgebend.

Für die Berechnungen wurden folgende Daten angenommen:

### Kupferleiter:

$$\begin{aligned} q &= 150 \text{ mm}^2 \text{ Querschnitt} \\ E &= 1,1 \cdot 10^6 \text{ kg/cm}^2 \\ \gamma_{00} &= 9,2 \cdot 10^{-3} \text{ kg/cm}^3 \end{aligned}$$

### Aldreyseil:

$$\begin{aligned} q &= 276 \text{ mm}^2 \text{ Querschnitt (entspricht } 150 \text{ mm}^2 \text{ Cu in be-} \\ &\text{zug auf die elektrische Leitfähigkeit)} \\ E &= 6 \cdot 10^5 \text{ kg/cm}^2 \\ \gamma_{00} &= 2,78 \cdot 10^{-3} \text{ kg/cm}^3 \end{aligned}$$

Die Montagespannung variiert für beide Seile zwischen  $p_0 = 200 \text{ kg/cm}^2$  bis  $p_0 = 1400 \text{ kg/cm}^2$  bei  $0^\circ$ .

Die horizontalen Spannweiten variieren in beiden Fällen zwischen

$$a = 100 \text{ m bis } a = 500 \text{ m.}$$

Die Ergebnisse der Berechnung sind in den Fig. 2 und 3 zusammengestellt in der Form  $\eta = f(p_0)$ , wo  $a$  der Parameter ist. Aus dem Vergleich der Kurven lassen sich folgende Schlüsse ziehen:

Für jede Spannweite existiert eine ungünstigste Montagespannung, bei welcher die Schnellhöhe ein Maximum ist.

a) Für Kupfer (Fig. 2) beträgt diese kritische Montagespannung

$$\begin{aligned} p_{0Kr} &\approx 1200 \text{ kg/cm}^2 \text{ für } a = 100 \text{ m} \\ p_{0Kr} &\approx 1300 \text{ kg/cm}^2 \text{ für } a = 200 \text{ m} \\ p_{0Kr} &\gg 1400 \text{ kg/cm}^2 \text{ für } a \geq 300 \text{ m} \end{aligned}$$

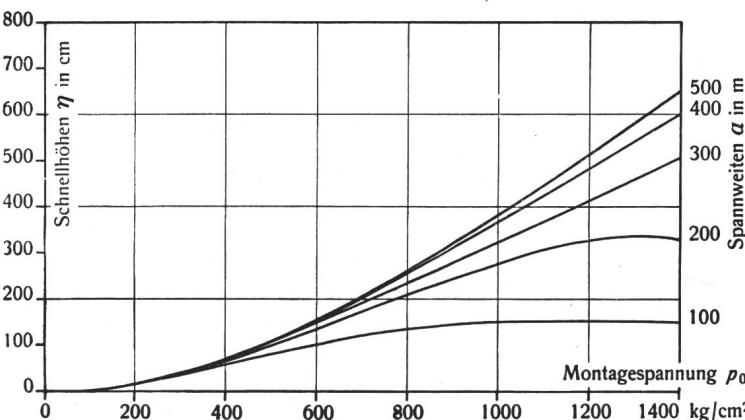
Da bei Kupfer-Freileitungen selten grössere Montagespannungen als 1200 kg/cm<sup>2</sup> gewählt werden, fallen die sich aus den Schnellhöheberechnungen ergebenden ungünstigsten Montagespannungen für Weitspannleitungen ausser Betracht.

Fig. 2.  
Schnellhöhen  $\eta$  von 150-mm<sup>2</sup>-Cu-Seil in Abhängigkeit der Montagespannung  $p_0$  für verschiedene Spannweiten  $a$  beim Abfallen einer Zusatzlast von 2 kg/m

b) Für Aldrey (Fig. 3) beträgt die kritische Montagespannung

$$\begin{aligned} p_{0Kr} &\approx 430 \text{ kg/cm}^2 \text{ für } a = 100 \text{ m} \\ p_{0Kr} &\approx 650 \text{ kg/cm}^2 \text{ für } a = 200 \text{ m} \\ p_{0Kr} &\approx 860 \text{ kg/cm}^2 \text{ für } a = 300 \text{ m} \\ p_{0Kr} &\approx 970 \text{ kg/cm}^2 \text{ für } a = 400 \text{ m} \\ p_{0Kr} &\approx 1200 \text{ kg/cm}^2 \text{ für } a = 500 \text{ m} \end{aligned}$$

Bei normalen Spannweiten von 200...300 m liegen die kritischen Montagespannungen im Bereich derjenigen Montagespannungen, die für Aldreyleitungen gewählt werden können. Aus der Schnellhöheberechnung folgt, dass die Montagespannungen tief und die Spannweiten nicht zu gross gewählt werden sollen, um ein Zusammenstauen der Leiter nach dem Lastabwurf zu verhüten.



Für grosse und schiefe Spannweiten sind in der Originalarbeit neue Zustandsgleichungen angegeben, welche an dieser Stelle jedoch nicht näher erläutert werden können.

## 7. Praktische Ergebnisse der Schnellhöheberechnungen

Beim Bau von Kraftübertragungsleitungen interessiert die Frage, wie sich die verschiedenen Leitermaterialien beim Abfallen von Zusatzlasten verhalten. Es wurde daher untersucht, wie gross die Schnellhöhen für Kupferseile im Vergleich zu leitwertgleichen Aldreyseilen bei gleichen Montagebedingungen für verschiedene horizontale Spannweiten werden, wenn eine Zusatzlast von 2 kg pro Laufmeter abfällt. Diese Zusatzlast ist gemäss den

c) Die absoluten Schnellhöhen liegen bei Kupferseil, das bis zu  $1000 \text{ kg/cm}^2$  gespannt ist, in der Größenordnung der normalen Leiterabstände für 150-kV-Leitungen, d. h. bei rund 4 m für 500 m Spannweite. Aldrey ergibt dagegen Schnellhöhen, die z. B. bei  $600 \text{ kg/cm}^2$  Montagespannung und 500 m

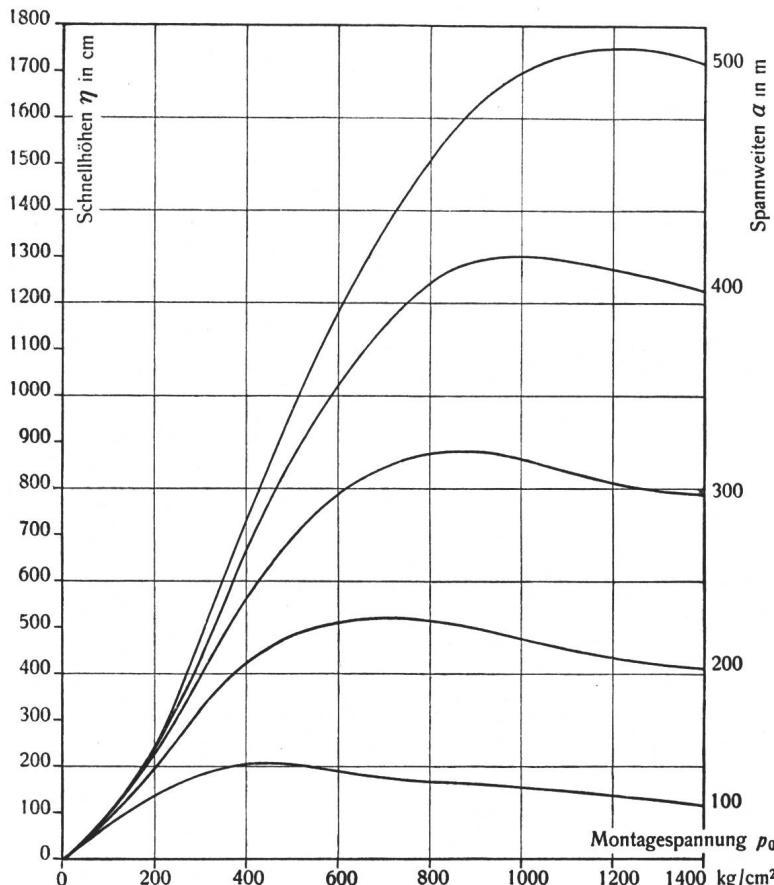
Im folgenden ist der Index « $x$ » der Einfachheit halber weggelassen. Soll die Schnellhöhe an der Stelle  $x$  bestimmt werden, sind die entsprechenden Durchhangsformeln zu benutzen, welche die Durchhänge und damit die Schnellwege  $\eta$  an der Stelle  $x$  ergeben. Der Schnellweg in Spannweitenmitte ist gleich der Differenz zwischen dem Durchhang  $f'_1$  des belasteten Seils und dem momentanen Durchhang  $f'$  des emporschnellenden Seiles.

$$\eta = f'_1 - f' = \frac{a^2}{8 \cos \psi} \left( \frac{\gamma_1}{p_1} - \frac{\gamma}{p} \right) + \frac{a^4}{384 \cos \psi} \left( \frac{\gamma_1^3}{p_1^3} - \frac{\gamma^3}{p^3} \right) \quad (27)$$

Die Größen  $\eta$ ,  $\gamma$ ,  $f'$ ,  $p$ ,  $\gamma$  ohne Index sind wieder, wie früher, zeitlich variable Größen.

Nach dem Abfallen der Zusatzlast beschreibt ein Seilpunkt den Schnellweg  $\eta$  zum Kulminationspunkt, bei welchem  $\eta = \eta_s$  ist. Weil  $f$  eine Funktion von  $\gamma$  ist, ist auch  $\eta$  eine Funktion von  $\gamma$ .

Wie bereits erwähnt, liefert die Zustandsgleichung den Zusammenhang zwischen den Scheitelspannungen  $p$  und den (virtuellen) spezifischen Gewichten  $\gamma$ . Insbesondere bei Berücksichtigung der Aenderung des Leiter-Eigengewichtes



Spannweite bei 12 m liegen, somit unter ähnlichen Montagebedingungen dreimal grösser sind als bei Kupfer.

Durch geeignete Wahl der Spannweiten und Montagespannungen hat man es in der Hand, für jedes Leitermaterial die vorteilhaftesten Bedingungen in bezug auf die Schnellhöhe zu schaffen.

### 8. Die Bestimmung der Schnellhöhe für Spannweiten über 1500 m mit beliebigen Sehnenneigungen

Für sehr grosse Spannweiten werden, wie bereits erwähnt, die analytischen Gleichungen, welche Schnellvorgänge bei Lastabwurf erfassen, derart unübersichtlich, dass sie für den praktischen Gebrauch nicht zweckdienlich wären. Es wurde daher für die Bestimmung der Schnellhöhe ein graphisches Verfahren entwickelt, das auf denselben Grundgleichungen basiert, die für die analytische Behandlung des Problems in den vorhergehenden Abschnitten Verwendung gefunden haben.

Die Beschleunigung  $\ddot{\eta}$  in Richtung des positiven Schnellweges ist auf Grund der Gl. (3)

$$\ddot{\eta} = \left( \frac{\gamma}{\gamma_{00}} - 1 \right) g \quad (26)$$

längs der Seilkurve zufolge der elastischen Dehnung empfiehlt es sich, die Zustandsgleichung für  $\gamma$  explizite darzustellen. Sie lautet:

$$\gamma = \pm \sqrt{\frac{p^2}{\varepsilon^2} \left[ \sqrt{A + B \frac{\varepsilon_0 - \varepsilon}{\varepsilon}} - F \right]} \quad (28)$$

Gl. (26) schreibt sich unter Benutzung von Gl. (28) zu

$$\eta = \left\{ \sqrt{\frac{p^2}{\varepsilon^2} \left[ \sqrt{A + B \frac{\varepsilon_0 - \varepsilon}{\varepsilon}} - F \right]} - 1 \right\} g \quad (29)$$

Die Konstanten der Gl. (28) und (29) bedeuten

$$\varepsilon = E \cdot a - p \cdot l'_{00}$$

$$\varepsilon_0 = E \cdot a - p_0 \cdot l'_{00}$$

$$A = 1600 E^4 + \frac{\gamma_{00}^2}{p_0^2} \varepsilon_0^2 \left( 80 E^2 + \varepsilon_0^2 \frac{\gamma_{00}^2}{p_0^2} \right)$$

$$B = \frac{1920 E^5 l'_{00} \cos \psi}{\varepsilon_0}$$

$$F = 40 E^2$$

Zunächst wird  $\gamma$  aus Gl. (28) für verschiedene gewählte Werte von  $p$  berechnet. Daraus und mit Hilfe der Gl. (27) und (29) werden die den Werten

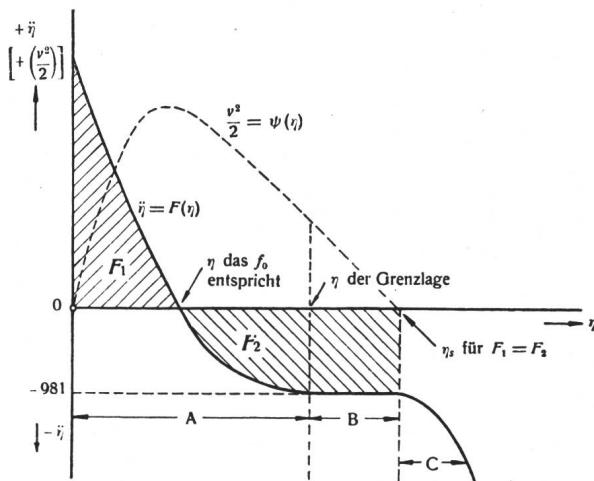
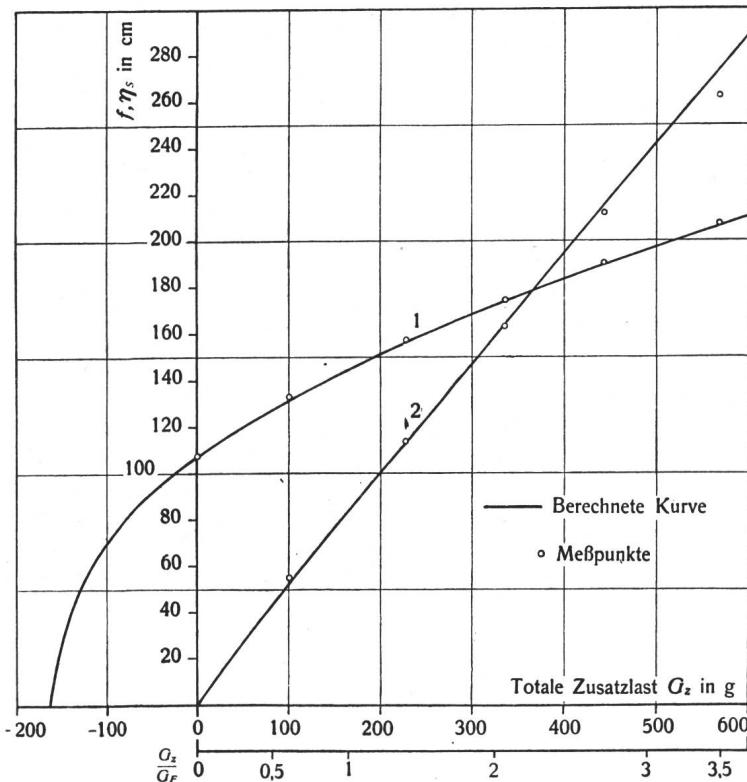


Fig. 4.

- A Zone, in welcher die Seilspannung mit wachsendem  $\eta$  kleiner wird (unteres elastisches Gebiet).  
 B Zone des dehnungsfreien Gebietes.  
 C Zone der wiederkehrenden Seilspannung (oberes elastisches Gebiet).

$p$  entsprechenden Werte  $\eta$  und  $\ddot{\eta}$  bestimmt. Die Differentialgleichung

$$\ddot{\eta} = F(\eta)$$



lässt sich nun als Kurve graphisch darstellen (vergl. Fig. 4). Es ist

$$\int_0^{\eta} \ddot{\eta} d\eta = \int_0^v v dv = \frac{v^2}{2} = \int_0^{\eta} F(\eta) d\eta$$

Die Planimetrierung der Kurve  $\ddot{\eta} = F(\eta)$  liefert somit den Wert für  $\frac{v^2}{2}$ . Im Kulminationspunkt, d. h. bei Erreichung der Schnellhöhe  $\eta_s$  ist die Geschwindigkeit  $v = 0$ , womit auch  $\frac{v^2}{2} = 0$  wird.

Also liefert derjenige Wert von  $\eta = \eta_s$  die gesuchte Schnellhöhe, bei welchem die Bedingung erfüllt ist

$$\int_0^{\eta_s} \ddot{\eta} d\eta = 0 \quad (30)$$

d. h. wo die Bedingung der Flächengleichheit  $F_1 = F_2$  in Fig. 4 erfüllt ist.

Um die Funktion «Schnellhöhe in Abhängigkeit von der Zusatzlast» bei sonst gleichbleibenden übrigen Daten der Leiter zu bestimmen, wird für jede gewählte Zusatzlast je eine Kurve  $\ddot{\eta} = F(\eta)$  aufgezeichnet und planimetriert, woraus sich die Schnellhöhe beim Abfallen verschiedener Zusatzlasten ermitteln lässt.

Dieses graphische Verfahren ist gültig für Schnellhöhen, die im unteren elastischen, im dehnungsfreien oder im oberen elastischen Gebiet liegen.

Versuche an einem Modell, das eine fiktive Spannweite von 200 km im Maßstab 1 : 40 000 darstellt, ergaben bei grossen Schnellhöhen und beim Abwurf grosser Zusatzlasten Abweichungen von den mittels des graphischen Verfahrens vorausbestimmten Werten von maximal 3,5 %. Die Abweichungen sind bei relativ stark gespannten Seilen mit grossen Schnellgeschwindigkeiten grösser als bei schwach gespannten. Sie sind wohl auf die Vernachlässigung des Einflusses des Luftwiderstandes sowie der Bewegungen benachbarter Seilteile zurückzuführen.

In Fig. 5 sind die berechneten und am Modell gemessenen Durchhänge und Schnellhöhen in Abhängigkeit von der Zusatzlast dargestellt. Den Berechnungen wurden die Gleichungen für die physikalisch richtige Seilkurvenform zugrunde gelegt, da die Kettenlinien-Formeln für derart grosse (theoretische) Spannweiten viel zu ungenaue Resultate geliefert hätten.

Fig. 5.  
 Kurve 1: Durchhang  $f$  } in Abhängigkeit von  
 Kurve 2: Schnellhöhe  $\eta_s$  } der Zusatzlast  $G_z$

## 9. Die Weg-Zeit-Funktion des hochschnellenden Seils

Die Kenntnis der Weg-Zeit-Funktion ist oft erwünscht, z. B. wenn es sich darum handelt, aus den Aufzeichnungen eines Störungsschreibers auf die Ursache von Störungen zu schliessen oder wenn es

sich um die Kontrolle eines Modellversuches handelt.

Aus der Kurve  $\ddot{\eta} = F(\eta)$  wird durch Planimetrierung die Funktion

$$\int_0^\eta \ddot{\eta} d\eta = \frac{v^2}{2}$$

bestimmt. Daraus lässt sich die Funktion

$$\frac{1}{v} = F_1(\eta)$$

ermitteln. Das Integral

$$\int_0^\eta F_1(\eta) d\eta = \int_0^\eta \frac{d\eta}{v} = t$$

liefert durch Planimetrierung der Funktion  $F_1(\eta) d\eta$  die gesuchte Weg-Zeit-Funktion

$$\eta = F_2(t)$$

In Fig. 6 ist die Weg-Zeit-Funktion eines hochschnellenden Modelleiters dargestellt. Kurve 5 ist die berechnete Kurve, Kurve 6 ist die Auswertung des entsprechenden Modellversuches, bei welchem

das hochschnellende Seilmodell mit Zeitlupenfilm (Aufnahmefrequenz 68 Bilder/s) aufgenommen wurde.

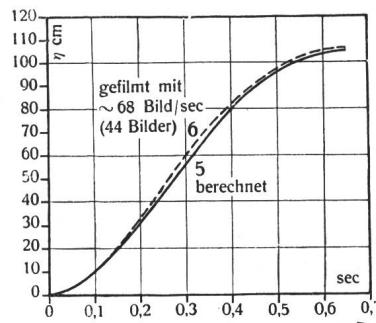


Fig. 6.  
Kurve 5: Berechnete Weg-Zeit-Funktion  $\eta = F_2(t)$   
Kurve 6: Durch Versuch ermittelte Weg-Zeit-Funktion.

Der Vergleich zwischen Versuch und Rechnung ergibt eine befriedigende Uebereinstimmung der Ergebnisse; der Charakter beider Kurven ist der selbe. Es ist der Schluss zulässig, dass die theoretische Untersuchung den dynamischen Vorgang des hochschnellenden Seiles (oder Drahtes) erfasst und für praktische Bedürfnisse genügend genaue Resultate liefert.

Adresse des Autors:  
Dr. G. Hunziker, Vizedirektor der Motor Columbus A.-G., Baden.

## Eichzähler und ihre Verwendung

Von O. Maag, Zug

621.317.785.089.6

Nach allgemeinen Erörterungen über die Zweckmässigkeit der Anwendung von Eichzählern zur Prüfung und Kontrolle im Gebrauch stehender Elektrizitätszähler beschreibt der Verfasser die von der Firma Landis & Gyr A.-G., Zug, gebauten Eichzähler für Ein- und Mehrphasen-Wechselstrom. Ferner werden die verschiedenen Methoden der Kontrollmessung besprochen und die Formeln zur Berechnung des Messfehlers des Prüflings erläutert.

Après un rapport de notions générales sur l'application de compteurs étais portatifs pour le contrôle de compteurs d'énergie électrique, l'auteur décrit les compteurs étais portatifs construits par la maison Landis & Gyr S. A., Zoug, et démontre les avantages qu'offrent aux exploitants le contrôle et la vérification périodique des compteurs installés dans leurs réseaux de distribution à l'aide de ces appareils.

### A. Allgemeines

Nach der in der Schweiz geltenden «Vollziehungsverordnung über die amtliche Prüfung von Elektrizitätsverbrauchsmessern» vom 23. Juni 1933 müssen diese Apparate mindestens alle 10 Jahre einer erneuten amtlichen Prüfung unterzogen werden. Artikel 38 dieser Verordnung bestimmt ferner, dass innerhalb dieser Frist je nach Bedarf Zwischenrevisionen auszuführen sind, und Art. 35 schreibt vor, dass derartige Prüfungen, falls vom Lieferanten oder vom Verbraucher elektrischer Energie Zweifel in die genaue Anzeige des Zählers geäussert werden, durch ein an der Energieabgabe unbeteiligtes Prüfamt zu erfolgen haben.

Zur Vergleichsmessung muss der Zähler demonstriert und auf die Eichstation genommen werden; ausserdem ist es nötig, beim Abonnenten einen Ersatzapparat zu installieren. In der Regel verfügen die Werke über ein ausreichendes Lager von Zählern der gebräuchlichsten Typen und Leistungsklassen, so dass die Auswechselung des beanstandeten Stücks rasch erfolgen kann. Zeigt es sich dann aber bei der Nachmessung auf der Eichstelle, dass die Beanstandung nicht stichhaltig war, so sind die Montage, der Hin- und Hertransport und die oft

nicht unerheblichen schriftlichen Arbeiten umsonst erfolgt.

Es ist deshalb zweckmässig und weniger zeitraubend, Zähler, deren Messgenauigkeit bezweifelt wird, an Ort und Stelle, d. h. beim Abonnenten, zunächst einer Vorprüfung zu unterwerfen und nur diejenigen auf die Eichstation zu nehmen, welche einen die Verkehrsfehlergrenze nach Art. 29 des Gesetzes über Mass und Gewicht übersteigenden Messfehler aufweisen, oder sich sonst in irgend einer Beziehung als revisionsbedürftig herausstellen (Art. 37 VV). Dabei soll natürlich der Bezüger in der freien Benützung seiner Installationen, Maschinen und Apparate möglichst wenig behindert werden. Das hat jedoch zur Folge, dass Kontrollmessungen mit Wattmetern, bedingt durch die auftretenden Belastungsschwankungen im Netze, sich nicht mit der wünschbaren hohen Genauigkeit durchführen lassen.

Die Verwendung eines möglichst genau geeichten Zählers zu derartigen Vergleichsmessungen lag deshalb nahe und führte dazu, dass die Zählerfabriken sog. «Eichzähler» auf den Markt brachten. Diese erfreuen sich, besonders auch im Ausland, steigender Beliebtheit, da sich mit ihrer Hilfe die laufende