

Zeitschrift: Schweizerische Bauzeitung
Herausgeber: Verlags-AG der akademischen technischen Vereine
Band: 84 (1966)
Heft: 19

Artikel: Zur Stabilität von Zugseilüberschlägen bei Seilschwebbahnen
Autor: Czitary, E.
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-68900>

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: 28.01.2026

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

Zur Stabilität von Zugseilüberschlägen bei Seilschwebbahnen

DK 625.576.4

Von Prof. Dr. E. Czitary, Wien, Institut für Eisenbahnbau und Spezialbahnen an der Technischen Hochschule Wien

A. Allgemeines

Bei den Zugseilen von Seilschwebbahnen mit Pendelbetrieb kommt es mitunter zu heftigen Schwingungen, die zu einem Überschlag des Zugseiles über das Tragseil führen können (Bild 1). Steigt bei einem solchen Überschlag das Zugseil nur ganz wenig über das Tragseil hinaus, dann schwingt es in seine frühere Lage wieder zurück. Ist jedoch das Zugseil bei seiner Schwingung höher über das Tragseil hinaus gestiegen, so kann es beim Zurückschwingen durch die Wirkung einer seitlichen Luftströmung aus seiner lotrechten Ebene abgetrieben werden und dann am Tragseil hängen bleiben.

Schwingungen des Zugseiles, bei denen es höher über das unbelastete ruhende Tragseil hinaussteigen kann, sind ausser bei starken Bremsungen am Antrieb hauptsächlich dann möglich, wenn an ein grösseres Seilfeld mit geringer Neigung talseitig ein solches mit grosser Neigung anschliesst. Führt ein belasteter Wagen über die Stütze talwärts, welche die beiden Seilfelder voneinander trennt, so erhöht sich die Zugwirkung des Wagens nahezu plötzlich, wodurch im Zugseiltrum oberhalb des Wagens starke Schwingungen entstehen können.

Bei einer rechnerischen Untersuchung dieser *Zugseilschwingungen*, die aus Längs- und Querschwingungen bestehen, muss das ganze am Schwingungsvorgang beteiligte Zugseilssystem erfasst werden. Es sind daher für die einzelnen Seilfelder beider Bahnseiten die Bewegungsgleichungen für die Zugseilschwingungen aufzustellen, zu welchen noch die entsprechenden Bewegungsgleichungen der Wagen, des Antriebswindwerkes und der Zugseilspannvorrichtung treten¹⁾. Dieses System linearer Differentialgleichungen zweiter Ordnung wird wegen der grossen Anzahl der Unbekannten am besten mit einer Analogierechenanlage gelöst. Wir erhalten so von den näherungsweise als Parabeln gedachten dynamischen Zugseilkurven den zeitlichen Verlauf ihrer Durchhänge in den Feldmitten. Durch Vergleich der kleinsten dieser Durchhänge der Zugseilkurven mit jenen der Leerseillinie des ruhenden Tragseiles kann man dann in den einzelnen Seilfeldern leicht feststellen, ob und wie hoch das Zugseil beim Schwingungsvorgang über das Tragseil hinaussteigt. Damit lässt sich auch der Abstand x der Schnittpunkte a und b zwischen der höchstgelegenen Zugseilkurve und der Leerseillinie des Tragseiles in einfacher Weise finden. Diese Punkte werden bei der der Wirklichkeit nahekommenden Annahme über die Gestalt der Seilkurven meistens symmetrisch zur Feldmitte liegen.

B. Untersuchung der Stabilität eines symmetrischen Zugseilüberschlages

Wurde auf dem vorhin angegebenen Weg festgestellt, dass in einem Seilfeld die Möglichkeit eines Zugseilüberschlages besteht, dann wird sich die Untersuchung hinsichtlich des Bestehenbleibens eines Überschlages in diesem Seilfeld wohl auf den Zustand zu beziehen haben, der nach erfolgter *Stillsetzung* der Bahn im Zusammenhang mit dem Überschlag und nach Abklingen *aller* Seilschwingungen herrscht, wie dies in Bild 1 durch die Kurven 4 und 5 zum Ausdruck kommt.

Wir betrachten daher die Möglichkeit von *Gleichgewichtsverhältnissen* in den Schnittpunkten a und b zwischen Trag- und Zugseil nach Wiederherstellung des *Ruhezustandes*, wobei wir ungünstigerweise voraussetzen, dass die Schnittpunkte a und b in diesem Fall die gleichen seien wie bei der höchsten Lage des Zugseiles während des Schwingungsvorganges. Die *Neigung* des betreffenden Seilfeldes soll mässig und die Seilkurven sollen schlank sein, was gewisse rechnerische Vereinfachungen gestattet, und es möge ferner die reibungslose Berührung der Seile in den Überschlagpunkten und die Berührung bei Wirkung der Reibung getrennt behandelt werden.

¹⁾ Czitary, E.: Über Schwingungen des Zugseiles von Seilschwebbahnen. «Österr. Ing.-Arch.», Bd. XV (1961), H. 1-4.

I. In den Überschlagpunkten herrscht keine Reibung

Bild 2 stellt den Bereich der unteren Überschlagsstelle a eines Seilfeldes mit den dort wirkenden Kräften dar. Bezeichnen S, S_1 die Trag- und Zugseilspannkkräfte beim Überschlagpunkt a , die links und rechts davon gleich gross sind,

H, H_1 die Horizontalkomponenten dieser Kräfte, die links und rechts von a näherungsweise auch gleich gross angenommen werden können,

und $q' = \frac{q}{\cos \gamma_0}$, $q'_1 = \frac{q_1}{\cos \gamma_0}$ die auf die Feldsehne bezogenen Seil-

eigengewichte je Längeneinheit, dann folgt für das Tragseil, wenn seine Form näherungsweise als Parabel aufgefasst wird, auf Grund bekannter Beziehungen

$$\left. \begin{aligned} \operatorname{tg} \alpha &= \operatorname{tg} \gamma' + \frac{x}{2c} \\ \operatorname{tg} \beta &= \operatorname{tg} \gamma_0 - \frac{l-2x}{2c} \end{aligned} \right\}, \text{ worin } c = \frac{H}{q'} \text{ der Tragseilparameter ist.}$$

Weiter erhalten wir für den Winkel φ , welchen die beiden Tragseiläste in a miteinander einschliessen,

$$\varphi = \beta - \alpha, \text{ oder } \operatorname{tg} \varphi = \operatorname{tg} \beta - \operatorname{tg} \alpha.$$

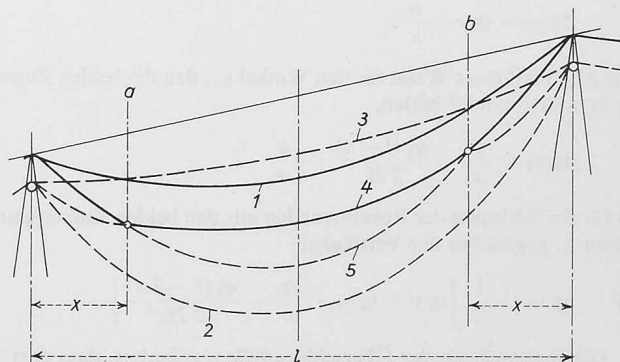
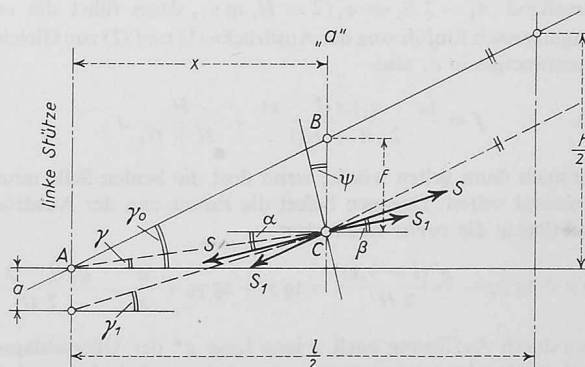


Bild 1. Seilfeld mit Zugseilüberschlag über das Tragseil

- 1 Leerseillinie des Tragseiles
- 2 Ruhelage des Zugseiles
- 3 Höchste Lage des Zugseiles bei der Schwingung
- 4 und 5 Ruhelage von Trag- und Zugseil nach dem Zugseilüberschlag



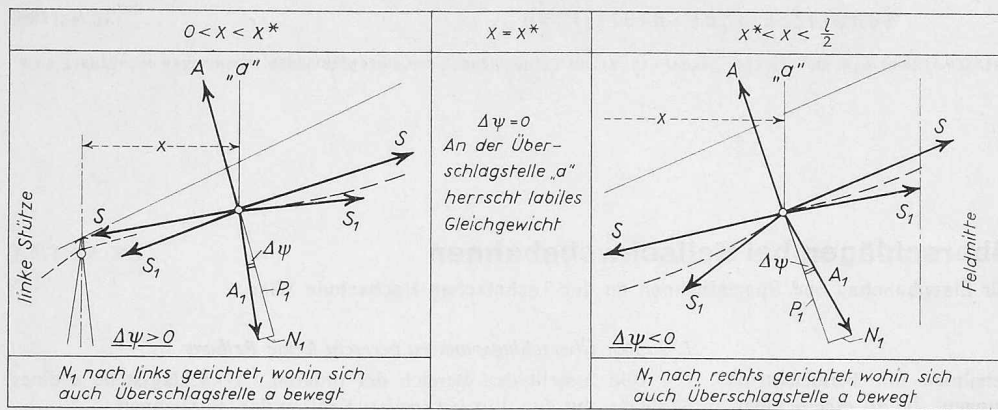


Bild 3. Abhängigkeit zwischen Seilüberschlag und Lage der Überschlagstellen

Dies ergibt nach Einführung der betreffenden Ausdrücke und mit

$$\begin{aligned} \operatorname{tg} \gamma &= \operatorname{tg} \gamma_0 - \frac{f}{x} \\ (1) \quad \operatorname{tg} \varphi &= \frac{f}{x} - \frac{q'(l-x)}{2H} \end{aligned}$$

Ferner entsteht für den Richtungswinkel ψ der Resultierenden der beiden Tragseilspannkkräfte S gegenüber der Vertikalen

$$\psi = \frac{\alpha + \beta}{2}, \quad \text{oder} \quad \operatorname{tg} \psi = \frac{\operatorname{tg} \alpha + \operatorname{tg} \beta}{2}.$$

Dies liefert nach Einsetzung der entsprechenden Werte

$$(1a) \quad \operatorname{tg} \psi = \frac{1}{2} \left[\operatorname{tg} \gamma + \operatorname{tg} \gamma_0 - \frac{q'(l-3x)}{2H} \right].$$

Ebensolche Beziehungen lassen sich auch für das Zugseil aufstellen, wobei jedoch zu beachten ist, dass wegen der auf den Stützen um das Mass a gegenüber dem Tragseil etwas tieferen Lagerung des Zugseiles die Beziehung gilt

$$\operatorname{tg} \gamma_1 = \operatorname{tg} \gamma + \frac{a}{x}.$$

Man erhält auf diese Weise für den Winkel φ_1 , den die beiden Zugseiläste in a miteinander bilden,

$$(2) \quad \operatorname{tg} \varphi_1 = \frac{f}{x} - \frac{q'_1(l-x)}{2H_1} - \frac{a}{x}$$

und für die Richtung der Resultierenden aus den beiden Zugseilspannkkräften S_1 gegenüber der Vertikalen

$$(2a) \quad \operatorname{tg} \psi_1 = \frac{1}{2} \left[\operatorname{tg} \gamma + \operatorname{tg} \gamma_0 + \frac{a}{x} - \frac{q'_1(l-3x)}{2H_1} \right].$$

Gleichgewicht an der Überschlagsstelle a erfordert, dass dort

1. die Resultierende A der Tragseilspannkkräfte S und die Resultierende A_1 der Zugseilspannkkräfte S_1 der Bedingung $A + A_1 = 0$ gehorchen und dass
2. $\psi - \psi_1 = 0$ ist.

Berücksichtigt man, dass $A = 2S \sin \varphi/2 \doteq H \operatorname{tg} \varphi$ und dementsprechend $A_1 = 2S_1 \sin \varphi_1/2 \doteq H_1 \operatorname{tg} \varphi_1$, dann führt die erste Bedingung nach Einführung der Ausdrücke (1) und (2) zur Gleichung des Durchhanges in a , also

$$(3) \quad f = \frac{(q' + q'_1)x(l-x)}{2(H + H_1)} + \frac{H_1}{H + H_1} a,$$

die auch dann gelten würde, wenn dort die beiden Seile miteinander *verknötet* wären. Dagegen liefert die Einsetzung der Ausdrücke (1a) und (2a) in die zweite Bedingung

$$\operatorname{tg} \gamma + \operatorname{tg} \gamma_0 - \frac{q'(l-3x)}{2H} = \operatorname{tg} \gamma + \operatorname{tg} \gamma_0 + \frac{a}{x} - \frac{q'_1(l-3x)}{2H_1},$$

was durch Auflösung nach x jene Lage x^* der Überschlagsstelle a^* und zufolge der angenommenen Symmetrieverhältnisse auch jene von b^* ergibt, bei denen ein Zugseilüberschlag *bestehen bleiben* kann. Man erhält

$$(3a) \quad x^* = \frac{l}{6} \pm \sqrt{\frac{l^2}{36} - \frac{2a}{3 \left(\frac{q'_1}{H_1} - \frac{q'}{H} \right)}},$$

wobei in den meisten praktischen Fällen, also grösseren Seilfeldern, nur das positive Vorzeichen vor der Wurzel in Betracht kommt, da das zweite Glied unter der Wurzel gegenüber dem ersten meistens klein ist und das negative Vorzeichen dann knapp an den beiden Stützen eines Seilfeldes liegende Überschlagsstellen ergibt, die *primär* nur von geringer praktischer Bedeutung sind. Das Gleichgewicht in den Überschlagsstellen ist stets ein *labiles*.

Man überzeugt sich leicht, dass eine gleichartige Betrachtung für die Überschlagsstelle b dasselbe Ergebnis liefert wie für a .

Bestimmt man mit den Gl. (1a) und (2a) für ein beliebiges $x \neq x^*$ die Winkel ψ und ψ_1 der gegenseitigen Seildrücke A und A_1 , dann gilt

$$\psi - \psi_1 = \Delta \psi \quad \text{oder}$$

$$(4) \quad \operatorname{tg} \Delta \psi = \operatorname{tg} \psi - \operatorname{tg} \psi_1 = \frac{l-3x}{4} \left(\frac{q'_1}{H_1} - \frac{q'}{H} \right) - \frac{a}{2x}.$$

Je nachdem ob nun $x \leq x^*$, ergeben sich an der Überschlagsstelle a die in Bild 3 veranschaulichten Verhältnisse, die analog auch für die symmetrische Überschlagsstelle b gelten. Die Projektion der Resultierenden A_1 auf die Richtung von A liefert die Komponenten P_1 und N_1 . Während zwischen P_1 und A Gleichgewicht möglich ist, erscheint die Richtung von N_1 dafür massgebend, ob sich die Überschlagsstelle a durch Quergleiten des Zugseiles am Tragseil gegen das linke Auflager oder gegen die Feldmitte bewegt. Da für die symmetrische Überschlagsstelle b das gleiche gilt, *vergrössert* sich im ersten Fall ein Seilüberschlag bis zur ganzen Feldweite und bleibt *dann dauernd bestehen*, während im zweiten Fall ein eingetretener Seilüberschlag von *selbst* wieder *verschwindet*.

II. In den Überschlagspunkten herrscht Reibung

Für das Gleichgewicht in einer beliebigen Überschlagsstelle a gilt hier so wie unter I die Bedingung (1), während die Bedingung (2) die Form $|\psi - \psi_1| = |\Delta \psi| \leq \kappa$ annimmt, wobei κ ein von der Grösse der Reibung zwischen den Seilen abhängiger Grenzwert ist. Auf die erste Bedingung brauchen wir aus den gleichen Gründen wie früher nicht einzugehen. Der zweiten Bedingung wird durch die Bestimmung von κ Rechnung getragen. Hierzu betrachten wir das in den Bereichen um a^* und b^* unter dem Einfluss der Reibung noch mögliche *Gleichgewicht*.

Da das Tragseil nicht nur viel steifer als das Zugseil ist, sondern auch viel stärker als letzteres gespannt wird, erscheint es an den Überschlagsstellen als vereinfachende Annäherung an die tatsächlichen Verhältnisse statthaft, die Tragseilaxe als *gerade* anzunehmen und mithin das Tragseil als einen Kreiszylinder, über den sich das Zugseil in Form einer Art *Schraubenlinie* legt (Bild 4). Wegen der bei Reibung bestehenden Verschiedenheit der Winkel ψ und ψ_1 sind in den Punkten c_1 und c_2 der zunächst betrachteten Überschlagsstelle a auch die Auf- und Ablaufwinkel ϵ_1 und ϵ_2 des Zugseiles am Tragseil voneinander verschieden, die wir wegen der oben genannten Vereinfachung durch $\epsilon'_1 \sim \epsilon_1$ und $\epsilon'_2 \sim \epsilon_2$ ersetzen. Gilt vorerst für den Abstand x der Überschlagsstelle a von der linken Stütze des Seilfeldes, wie in Bild 4 angenommen, $x < x^*$, dann muss im Hinblick auf Bild 3 $\psi > \psi_1$ und $\epsilon'_1 < \epsilon'_2$ sein. Ist dagegen $x > x^*$, so folgt $\psi < \psi_1$ und $\epsilon'_1 > \epsilon'_2$. Beim

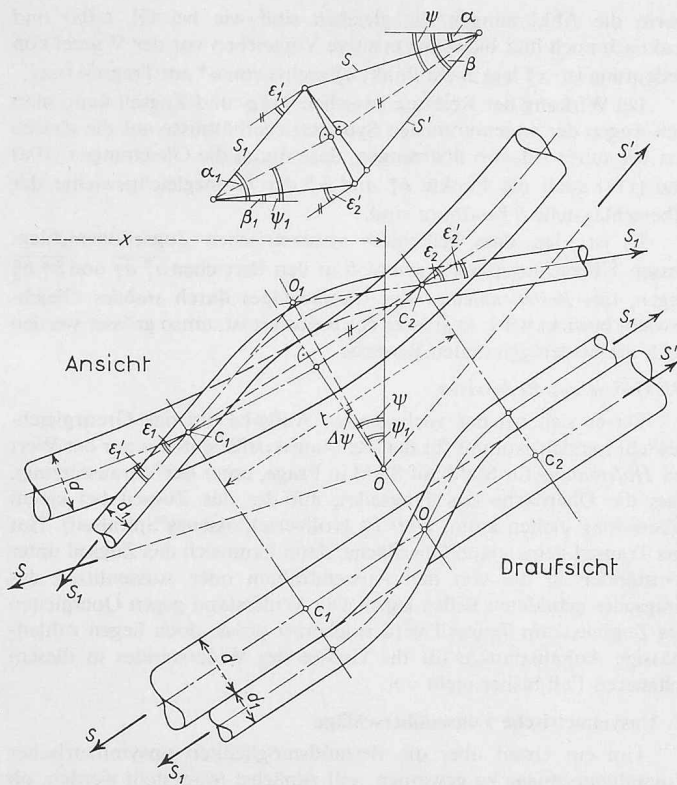


Bild 4. Gleichgewichtsverhältnisse an einer Ueberschlagstelle a mit $x < x^*$ bei der Wirkung einer Reibung zwischen Trag- und Zugseil. Verformung der Seile stark verzerrt dargestellt

Grenzgleichgewicht, also der vollständigen Ausnutzung der Reibung zwischen den Seilen, wird demnach das Zugseil am Tragseil eine Schraubenlinie mit annähernd linear zunehmenden oder abnehmenden Neigungswinkel ϵ' bilden. Denkt man sich im Bereich zwischen c_1 und c_2 den Mantel des Zylinders abgewickelt, in dem die Zugseilaxe liegt, so ergeben sich die durch Bild 5 veranschaulichten Verhältnisse, und es ändert sich an einem Zugseilelement von der Länge ds der Neigungswinkel ϵ' um

$$d\epsilon' = \frac{\Delta \epsilon'}{s} ds, \quad \text{worin} \quad \Delta \epsilon' = \epsilon'_1 - \epsilon'_2.$$

Durch die an den Enden des Zugseilelementes wirkende Seilspannkraft S_1 wird auf das Tragseil eine Kraft dA_1 ausgeübt, welche wir in die Komponenten dP und dT zerlegen. Legt man am Ort des Zugseilelementes ds eine Tangentialebene an die Mantelfläche des vorgenannten Zylinders, dann möge dT in dieser Ebene liegen und dP senkrecht auf sie stehen. Aus Bild 6 ergibt sich mithin

$$(5) \quad dT = S_1 d\epsilon' = S_1 \frac{\Delta \epsilon'}{s} ds.$$

Ist gemäss den Bildern 4 und 5 d der Tragseildurchmesser und d_1 der Zugseildurchmesser, dann lässt sich bei der angenommenen Form des Zugseiles an der Überschlagstelle und unter der Voraussetzung, dass $\Delta \epsilon'$ klein ist, näherungsweise für den Krümmungsradius des betrachteten Zugseilelementes

$$\rho = \frac{d + d_1}{2 \sin^2 \epsilon_m} \quad \text{schreiben}^2), \quad \text{worin} \quad \epsilon_m = \frac{\epsilon'_1 + \epsilon'_2}{2}.$$

Damit folgt

$$(6) \quad dP = \frac{S_1}{\rho} ds = \frac{2 S_1 \sin^2 \epsilon_m}{d + d_1} ds.$$

Am Zugseilelement ds herrscht nun solange Gleichgewicht, als $dT \leq \mu dP$, wenn μ der Reibungskoeffizient bei der Querreibung des Zugseiles auf dem Tragseil ist. Da die Querreibung allein zur Aufrechterhaltung des Gleichgewichtes an der Überschlagstelle a genügt, wird im Falle, dass die obige Gleichgewichtsbedingung nicht mehr erfüllt ist, ein Gleiten des Zugseiles am Tragseil in der Querrichtung des

²⁾ Krümmungsradius einer gewöhnlichen zylindrischen Schraubenlinie.

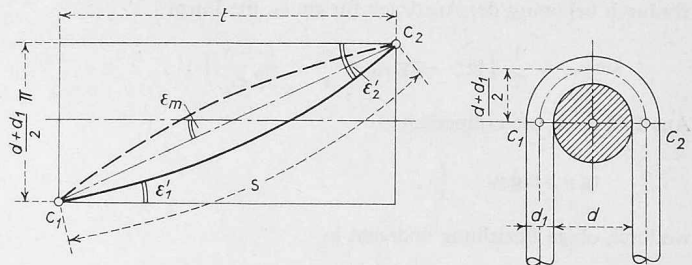


Bild 5. Abwicklung des Zylindermantels in dem an der Ueberschlagstelle a die Zugseilaxe liegt

ersteren stattfinden. Dabei kommen, wie man leicht einsieht, fortwährend neue Teile des Zugseiles in Berührung mit dem Tragseil, und es wandert so die Überschlagstelle auf letzterem entlang. Spannkraftänderungen im Zugseil treten mithin im Gegensatz zum Tragseil durch die Wirkung der Reibung beim geschilderten Gleitvorgang nicht ein.

Bedenken wir, dass beim Grenzgleichgewicht Verschiebungen des Zugseiles am Tragseil gerade noch verhindert sind und setzen für dP und dT in die obige Gleichgewichtsbedingung die Werte aus den Gleichungen (5) und (6) ein, so folgt im Hinblick darauf, dass $\Delta \epsilon' < 0$ bei $x < x^*$ gilt,

$$\Delta \epsilon'_{\max} = - \frac{2 \sin^2 \epsilon_m}{d + d_1} s \mu.$$

$$\text{Da} \quad s = \frac{(d + d_1) \pi}{2 \sin \epsilon_m},$$

ergibt sich schliesslich

$$(7) \quad \Delta \epsilon'_{\max} = - \mu \pi \sin \epsilon_m.$$

Weiter haben wir den für das Grenzgleichgewicht massgebenden Wert von $\Delta \psi = \kappa$ durch $\Delta \epsilon'_{\max}$ auszudrücken. Aus dem Kräfteck in Bild 4 lesen wir ab

$$(8) \quad \begin{aligned} \epsilon'_1 &= \alpha_1 - \psi \\ \epsilon'_2 &= -\beta_1 + \psi, \end{aligned}$$

woraus durch Subtraktion

$$\Delta \epsilon' = \alpha_1 + \beta_1 - 2\psi$$

entsteht. Da jedoch $\psi_1 = (\alpha_1 + \beta_1)/2$, so erhalten wir

$$\Delta \epsilon' = 2(\psi_1 - \psi) = -2\Delta \psi \quad \text{oder} \quad \Delta \epsilon'_{\max} = -2\kappa.$$

Damit geht Gl. (7) über in

$$(7a) \quad \kappa = \frac{\mu \pi \sin \epsilon_m}{2} \quad \text{für} \quad x < x^*.$$

Setzt man ferner in die früher für ϵ_m angeschriebene Beziehung die Werte von ϵ'_1 und ϵ'_2 aus Gl. (8) ein, dann folgt

$$\epsilon_m = \frac{1}{2} (\alpha_1 - \psi - \beta_1 + \psi) = \frac{\alpha_1 - \beta_1}{2}.$$

Entsprechend den am Anfang von B gemachten Voraussetzungen gilt auch

$$\sin \epsilon_m = \text{tg } \epsilon_m = \frac{\text{tg } \alpha_1 - \text{tg } \beta_1}{2}, \quad \text{worin bekanntlich}$$

$$\left. \begin{aligned} \text{tg } \alpha_1 &= \text{tg } \gamma + \frac{a}{x} + \frac{x}{2c_1} \\ \text{tg } \beta_1 &= \text{tg } \gamma_0 - \frac{l - 2x}{2c_1} \end{aligned} \right\} \quad \text{mit} \quad c_1 = \frac{H_1}{q_1}.$$

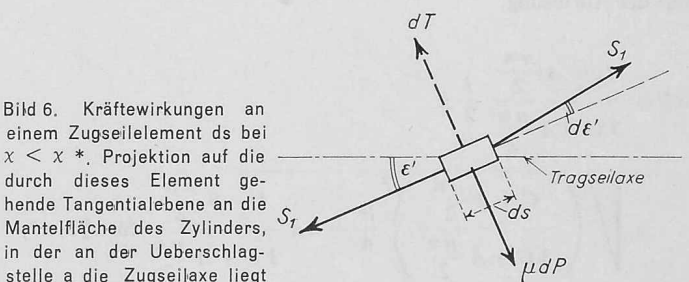


Bild 6. Kräftewirkungen an einem Zugseilelement ds bei $x < x^*$. Projektion auf die durch dieses Element gehende Tangentialebene an die Mantelfläche des Zylinders, in der an der Überschlagstelle a die Zugseilaxe liegt

Dadurch bekommt der Ausdruck für $\sin \varepsilon_m$ die Form

$$\sin \varepsilon_m \doteq \frac{1}{2} \left(\operatorname{tg} \gamma - \operatorname{tg} \gamma_0 + \frac{a}{x} + \frac{l-x}{2 c_1} \right).$$

Aus Bild 2 ist, wie erinnerlich

$$\operatorname{tg} \gamma = \operatorname{tg} \gamma_0 - \frac{f}{x},$$

wodurch obige Beziehung übergeht in

$$\sin \varepsilon_m \doteq \frac{1}{2} \left(\frac{a}{x} + \frac{l-x}{2 c_1} - \frac{f}{x} \right).$$

Schliesslich haben wir in diese Gleichung den Wert von f aus Gl. (3) einzuführen und erhalten so

$$\sin \varepsilon_m \doteq \frac{1}{2} \left[\frac{l-x}{2} \left(\frac{q'_1}{H_1} - \frac{q' + q'_1}{H + H_1} \right) + \frac{H}{H + H_1} \frac{a}{x} \right]$$

und Gl. (7a) endlich in der Gestalt

$$(9) \quad \kappa = \frac{\mu \pi}{4} \left[\frac{l-x}{2} \left(\frac{q'_1}{H_1} - \frac{q' + q'_1}{H + H_1} \right) + \frac{H}{H + H_1} \frac{a}{x} \right].$$

Setzt man diesen Grenzwert von $\Delta \psi$ in Gl. (4) ein, so ist dadurch bei Wirkung der Reibung im Falle $x < x^*$ die Bestimmungsgleichung für jenes $x_1^* < x^*$ gewonnen, bei welchem noch Gleichgewicht an der Überschlagsstelle a möglich ist. Diese Bestimmungsgleichung lautet

$$(10) \quad \frac{\mu \pi}{2} \left[\frac{l-x}{2} \frac{q'_1 H - q' H_1}{H_1 (H + H_1)} + \frac{H}{H + H_1} \frac{a}{x} \right] = \frac{l-3x}{2} \frac{q'_1 H - q' H_1}{H_1 H} - \frac{a}{x}$$

mit der Auflösung

$$(a) \quad \left\{ \begin{aligned} x_1^* &= \frac{C - A \frac{\mu \pi}{2}}{3 C - A \frac{\mu \pi}{2}} \frac{l}{2} \pm \\ &\pm \sqrt{\left(\frac{C - A \frac{\mu \pi}{2}}{3 C - A \frac{\mu \pi}{2}} \right)^2 \frac{l^2}{4} - 2 a \frac{1 + B \frac{\mu \pi}{2}}{3 C - A \frac{\mu \pi}{2}}} \quad \text{für } x_1^* < x^*, \end{aligned} \right.$$

worin

$$A = \frac{q'_1 H - q' H_1}{H_1 (H + H_1)}, \quad B = \frac{H}{H + H_1} \quad \text{und} \quad C = \frac{q'_1 H - q' H_1}{H_1 H}.$$

Praktisch kommt aus denselben Gründen, wie zu Gl. (3a) angeführt, nur das positive Vorzeichen vor der Wurzel in Frage. Durch x_1^* wird also ein Punkt a_1^* links von a^* festgelegt.

Ziehen wir hingegen eine Überschlagsstelle a in Betracht, für welche $x > x^*$, dann ist bekanntlich

$$\varepsilon'_1 > \varepsilon'_2, \text{ also } \Delta \varepsilon' > 0 \quad \text{und} \quad \Delta \psi < 0.$$

Beim Grenzgleichgewicht behalten mithin die Gleichungen (7), (7a) und (9) ihre Gültigkeit nur bei, wenn man auf der rechten Seite die Vorzeichen umkehrt. Gl. (10) geht dadurch über in

$$(11) \quad -\frac{\mu \pi}{2} \left[\frac{l-x}{2} \frac{q'_1 H - q' H_1}{H_1 (H + H_1)} + \frac{H}{H + H_1} \frac{a}{x} \right] = \frac{l-3x}{2} \frac{q'_1 H - q' H_1}{H_1 H} - \frac{a}{x}$$

mit der Auflösung

$$(a) \quad \left\{ \begin{aligned} x_2^* &= \frac{C + A \frac{\mu \pi}{2}}{3 C + A \frac{\mu \pi}{2}} \frac{l}{2} \pm \\ &\pm \sqrt{\left(\frac{C + A \frac{\mu \pi}{2}}{3 C + A \frac{\mu \pi}{2}} \right)^2 \frac{l^2}{4} - 2 a \frac{1 - B \frac{\mu \pi}{2}}{3 C + A \frac{\mu \pi}{2}}} \quad \text{für } x_2^* > x^*, \end{aligned} \right.$$

worin die Abkürzungen die gleichen sind wie bei Gl. (10a) und praktisch auch hier bloss das positive Vorzeichen vor der Wurzel von Bedeutung ist. x_2^* legt einen Punkt a_2^* rechts von a^* am Tragseil fest.

Bei Wirkung der Reibung zwischen Trag- und Zugseil kann man sich wegen der angenommenen Symmetrieverhältnisse auf die gleiche Art wie unter I davon überzeugen, dass durch die Gleichungen (10a) und (11a) auch die Punkte b_1^* und b_2^* der Grenzgleichgewichte der Überschlagsstelle b bestimmt sind.

Es ist klar, dass bei einem symmetrischen Zugseilüberschlag, dessen Überschlagspunkte a und b in den Bereichen $a_1^* a_2^*$ und $b_1^* b_2^*$ liegen, das Bestehenbleiben des Überschlages durch stabiles Gleichgewicht bewirkt wird. Je grösser der Reibwert ist, umso grösser werden auch die beiden genannten Bereiche.

III. Grösse des Reibwertes

Da es sich bei der vorliegenden Aufgabe um das Grenzgleichgewicht handelt, kommt für den Reibungskoeffizienten μ nur der Wert der Haftreibung für Stahl auf Stahl in Frage, unter der Voraussetzung, dass die Oberfläche des Tragseiles, auf der das Zugseil bei einem Überschlag gleiten kann, glatt ist (vollverschlossenes Spiralseil). Hat das Tragseil keine glatte Oberfläche, dann kann sich das Zugseil unter Umständen in die von den Aussendrähten oder Aussenlitzen des Tragseiles gebildeten Rillen legen. Der Widerstand gegen Quergleiten des Zugseiles am Tragseil wird solcherart gross, doch liegen zahlenmässige Anhaltspunkte für die Grösse des Widerstandes in diesem selteneren Fall bisher nicht vor.

C. Unsymmetrische Zugseilüberschläge

Um ein Urteil über die Bestandsmöglichkeit unsymmetrischer Zugseilüberschläge zu gewinnen, soll zunächst festgestellt werden, ob auch bei Fehlen der Reibung zwischen den Seilen ein unsymmetrischer Zugseilüberschlag in ähnlicher Weise wie ein symmetrischer (siehe B I) bestehen bleiben kann.

Wir betrachten zu diesem Zweck ein Seilfeld mit zwei Überschlagspunkten a und b , die von den beiden Stützpunkten die verschiedenen grossen Abstände x und \bar{x} haben.

Es gilt dann aufgrund von Bild 7 für das Tragseil unter Berücksichtigung der Ausführungen in B I

$$\begin{aligned} \operatorname{tg} \alpha &= \operatorname{tg} \gamma + \frac{x}{2 c} & \operatorname{tg} \bar{\alpha} &= \operatorname{tg} \bar{\gamma} - \frac{\bar{x}}{2 c}, \\ \operatorname{tg} \beta &= \operatorname{tg} \bar{\gamma} - \frac{l-x-\bar{x}}{2 c} & \operatorname{tg} \bar{\beta} &= \operatorname{tg} \bar{\gamma} + \frac{l-x-\bar{x}}{2 c}, \\ \operatorname{tg} \psi &= \frac{\operatorname{tg} \alpha + \operatorname{tg} \beta}{2} = \frac{1}{2} \left(\operatorname{tg} \gamma + \operatorname{tg} \bar{\gamma} - \frac{l-2x-\bar{x}}{2 c} \right), \\ \operatorname{tg} \bar{\psi} &= \frac{\operatorname{tg} \bar{\alpha} + \operatorname{tg} \bar{\beta}}{2} = \frac{1}{2} \left(\operatorname{tg} \bar{\gamma} + \operatorname{tg} \bar{\gamma} + \frac{l-x-2\bar{x}}{2 c} \right). \end{aligned}$$

Die gleichen Beziehungen kann man auch für das Zugseil ansetzen, wobei man für

$$\operatorname{tg} \gamma_1 = \operatorname{tg} \gamma + \frac{a}{x} \quad \text{und für} \quad \operatorname{tg} \bar{\gamma}_1 = \operatorname{tg} \bar{\gamma} - \frac{a}{x}$$

zu schreiben hat. Auf diese Weise erhalten wir

$$\begin{aligned} \operatorname{tg} \psi_1 &= \frac{1}{2} \left(\operatorname{tg} \gamma + \frac{a}{x} + \operatorname{tg} \bar{\gamma} - \frac{l-2x-\bar{x}}{2 c_1} \right), \\ \operatorname{tg} \bar{\psi}_1 &= \frac{1}{2} \left(\operatorname{tg} \bar{\gamma} - \frac{a}{x} + \operatorname{tg} \bar{\gamma} + \frac{l-x-2\bar{x}}{2 c_1} \right). \end{aligned}$$

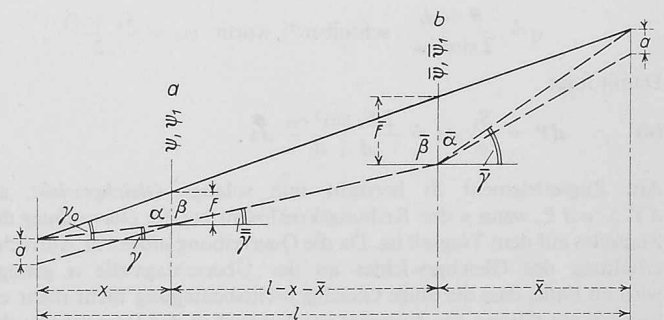


Bild 7. Seilfeld mit einem unsymmetrischen Zugseilüberschlag. Die Seilwinkel selbst sind nicht eingezeichnet, sondern es ist nur ihr Ort eingetragen

Schliesslich lauten die hier zu benutzenden Bedingungsgleichungen $\psi - \psi_1 = \bar{\psi} - \bar{\psi}_1 = 0$ oder nach Einsetzung obiger Werte

$$\begin{aligned} \operatorname{tg} \gamma + \operatorname{tg} \bar{\gamma} - \frac{l - 2x - \bar{x}}{2c} &= \operatorname{tg} \gamma + \frac{a}{x} + \operatorname{tg} \bar{\gamma} - \frac{l - 2x - \bar{x}}{2c_1}, \\ \operatorname{tg} \bar{\gamma} + \operatorname{tg} \gamma - \frac{l - x - 2\bar{x}}{2c} &= \operatorname{tg} \bar{\gamma} - \frac{a}{x} + \operatorname{tg} \gamma + \frac{l - x - 2\bar{x}}{2c_1}. \end{aligned}$$

Durch Vereinfachung entsteht weiter

$$(12) \quad \begin{cases} \frac{2a}{\frac{1}{c} - \frac{1}{c_1}} + (l - 2x - \bar{x})x = 0, \\ \frac{2a}{\frac{1}{c} - \frac{1}{c_1}} + (l - 2\bar{x} - x)\bar{x} = 0. \end{cases}$$

Zur Bestimmung der Wurzeln des Gleichungssystems (12) subtrahiert man die untere Gleichung von der oberen und erhält so

$$lx - 2x^2 - l\bar{x} + 2\bar{x}^2 = 0,$$

was durch Auflösung nach \bar{x} die Zusammenhänge $\bar{x} = l/2 - x$ oder $\bar{x} = x$ ergibt. Diese Werte führt man der Reihe nach in die erste der Gl. (12) ein und bekommt

$$\text{für } \bar{x} = \frac{l}{2} - x \dots x_{1,2}^* = \frac{l}{4} \pm \sqrt{\frac{l^2}{16} - \frac{2a}{\frac{1}{c_1} - \frac{1}{c}}}$$

$$\text{und damit } \bar{x}_{1,2}^* = \frac{l}{4} \mp \sqrt{\frac{l^2}{16} - \frac{2a}{\frac{1}{c_1} - \frac{1}{c}}}$$

$$\text{für } \bar{x} = x \dots x_{3,4}^* = \frac{l}{6} \pm \sqrt{\frac{l^2}{36} - \frac{2a}{3\left(\frac{1}{c_1} - \frac{1}{c}\right)}}$$

$$\text{und damit } \bar{x}_{3,4}^* = \frac{l}{6} \pm \sqrt{\frac{l^2}{36} - \frac{2a}{3\left(\frac{1}{c_1} - \frac{1}{c}\right)}}$$

Berücksichtigt man, dass nach B I in den meisten praktischen Fällen das zweite Glied unter den Wurzeln viel kleiner als das erste ist, so dass es unter Umständen vernachlässigt werden kann, dann erkennt man, dass die Wurzeln $x_{1,2}^*$ und $\bar{x}_{1,2}^*$ wegen der Gestalt der Seilkurven eines schwingenden Zugseiles für tatsächliche Zugseilüberschläge *kaum* in Betracht kommen können. Es verbleiben daher für wahrscheinliche Zugseilüberschläge nur die Wurzeln $x_{3,4}^*$ und $\bar{x}_{3,4}^*$, durch welche aber der unter B I behandelte Fall eines *symmetrischen* Zugseilüberschlages gekennzeichnet ist.

Handelt es sich nun um das Bestehenbleiben von unsymmetrischen Zugseilüberschlägen, wenn die *Reibung* zwischen den Seilen wirkt, dann ist es nicht schwer, auf Grund der Darlegungen in dieser Arbeit für eine *bestimmte* Art des Überschlages festzustellen, ob sie Bestand haben könne.

D. Einfluss einer Längsbewegung des Zugseiles auf den Bestand eines Zugseilüberschlages

Aus den bisherigen Betrachtungen ergab sich, dass das Zugseil bei einem Überschlag trotz erfolgter *Stillsetzung* der Bahn das Bestreben hat, an den Überschlagstellen *a* und *b* *quer* zu seiner Längsrichtung am Tragseil zu gleiten. Die Reibung verhindert jedoch das Quergleiten des Zugseiles am Tragseil, wenn sich die Überschlagstellen *a* und *b* innerhalb gewisser Bereiche beiderseits der ausgezeichneten Stellen *a** und *b** befinden.

Wird dagegen das Zugseil nach einem Überschlag über das Tragseil in seiner Längsrichtung *weiterbewegt*, so kann diese Bewegung, wie in der Folge gezeigt wird, die Wirkung der Reibung nahezu aufheben. Da die Reibung *dR* eines Zugseilelementes *ds* an der Überschlagstelle nur von der Grösse seines Normaldruckes *dP* abhängig ist, den es auf das Tragseil ausübt, kann beim längsbewegten Zugseil im Gegensatz zum unbewegten nicht mehr die ganze Reibung sein Quergleiten verhindern. Es können dadurch Verhältnisse eintreten, die bezüglich der Möglichkeit eines Quergleitens des Zugseiles am Tragseil nahezu einem *reibungslosen* Zustand entsprechen, wie er unter B I behandelt worden ist.

Tabelle 1. Daten des betrachteten Seilfeldes

Bezeichnung	Auf die Feldseilsehe bezogenes Seilgewicht	Horizontal-komponente der Seilspannkraft	Seilparameter
Tragseil	$q' = 10,0 \text{ kg/m}$	$H = 55\,000 \text{ kg}$	$c = H/q' = 5500 \text{ m}$
Zugseil	$q_1' = 2,3 \text{ kg/m}$	$H_1 = 9\,200 \text{ kg}$	$c_1 = H_1/q_1' = 4000 \text{ m}$

Man sieht daraus, dass eine *Längsbewegung* des Zugseiles nach einem eingetretenen Zugseilüberschlag nur dann zu dessen Beseitigung *vorteilhaft* sein wird, wenn für den Abstand *x* der Überschlagstellen *a* und *b* vom nächsten Stützpunkt $x > x^*$ gilt. Im umgekehrten Fall, also bei $x < x^*$, bewirkt eine Längsbewegung des Zugseiles nur ein Gleiten der Überschlagstellen gegen die Stützpunkte des Seilfeldes, wodurch sich der Überschlag schliesslich fast auf die ganze Länge des Seilfeldes erstreckt und dann mitunter schwierig zu beseitigen ist. Oft gelingt es, einen solchen Zugseilüberschlag dadurch rückgängig zu machen, dass man etwas ausserhalb des Bereiches zwischen dem Seilfeld mit dem Überschlag und dem Antrieb das Zugseil festklemmt und dann den Antrieb vorsichtig in Bewegung setzt. Das Zugseil wird dadurch stärker gespannt; es verkleinert sich sein Durchhang zwischen den Überschlagpunkten und schliesslich fällt es vom Tragseil ab. Zum Festklemmen des Zugseiles an einer geeigneten Stelle benützt man dabei den Seilbahnwagen, dessen auf das Tragseil wirkende Fangvorrichtung dort zum Einfallen gebracht wird.

E. Beispiel

Bei einer Personenseilschwebbahn mit Pendelbetrieb mögen für die Seile in jenem Seilfeld, wo ein Zugseilüberschlag möglich wäre, die Daten der Tabelle 1 gelten:

Die betreffende Spannweite betrage $l = 530 \text{ m}$; ferner gilt für $a = 0,25 \text{ m}$ und für den Reibwert $\mu = 0,10$. Damit ergeben sich für die links der Feldmitte gelegene Überschlagstelle *a* nachstehende, die Hauptpunkte kennzeichnenden Werte:

$$x_1^* = 138,6 \text{ m (21,0)}$$

$$x^* = 161,4 \text{ m (15,4)}$$

$$x_2^* = 181,2 \text{ m (11,2)}$$

$$x_2^* - x_1^* = 42,6 \text{ m}$$

Es wurde Symmetrie des Seilüberschlages vorausgesetzt. Die eingeklammerten Werte ergeben sich aus den negativen Wurzeln, sind aber praktisch kaum von Bedeutung. Die Winkel sind mit $\epsilon' \sim 0,006$ sehr klein, was bedeutet, dass die Übergangsstelle einige Meter lang ist.

Adresse des Verfassers: Prof. Dr. E. Czitary, Titlgasse 5, Wien XIII.

Berechnung von Spurleistungsfähigkeiten

DK 656.1.051

In seinem Aufsatz über «Die Wirksamkeit von Lichtsignalanlagen» (SBZ 1966, H. 11, S. 212) legt Dr. P. Pitzinger dar, dass Fehler bei Leistungsfähigkeitsnachweisen in der Hauptsache aus der Verwendung von zu hohen Spurleistungsfähigkeiten pro Grünstunde entstehen und beispielsweise auch das häufig verwendete «Zeit-Weg-Verfahren» mit 1800 PWE/Grünstunde rechne. Dabei wird auf das Buch «Verkehr und Städtebau» hingewiesen. Dessen Verfasser, Prof. Dr.-Ing. K. Leibbrand, macht nun darauf aufmerksam, dass das «Zeit-Weg-Verfahren» nicht auf bestimmten Werten beruhe, sondern beliebige Werte eingesetzt werden können. Immerhin ist die Leistungsfähigkeit von 1800 PWE/h aufgrund eingehender Beobachtungen und Versuche, teilweise im Rahmen von Forschungsaufträgen von ETH und VSS, nachgeprüft worden, wobei sich Abweichungen von höchstens 4% ergeben haben. In den USA wird in Einzelfällen sogar bis 2500 PWE/h, also 1,4 s pro Fahrzeug gegangen. Die Betrachtungen von Dr. P. Pitzinger beschränken sich aber auf isolierte Lichtsignalanlagen. Bei diesen Anlagen sind Spurleistungsfähigkeiten von über 1800 PWE/Grünstunde nur erreichbar bei einem ständigen Rückstau von Fahrzeugen und bei Wartezeiten über mehrere Umlaufzeiten. Die Länge des zulässigen Rückstaues ist aber eine wirtschaftliche Frage, dahin lautend, ob die wirtschaftlichen Verluste durch wartende Fahrzeuge an einer Lichtsignalanlage eher in Kauf genommen werden können als der Aufwand für einen gewissen Ausbau der Kreuzung. Prof. Leibbrand meint, dass es sich die Städte nicht leisten können, Anlagen mit nur 1300 PWE/Grünstunde Leistungsfähigkeit zu bauen.