Zeitschrift: Schweizerische Bauzeitung
Herausgeber: Verlags-AG der akademischen technischen Vereine
Band: 90 (1972)
Heft: 38

Artikel: Statische Berechnung eines Seiltragwerkes für Hängebahnen
Autor: Wettstein, H.
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-85313

tag zwischen 9 und 10 Uhren unter Gebett der Anwesenden Verwandtschafften selig verscheiden, aetatis 2 Monat weniger als 74 Jahr.

Literaturverzeichnis

William Coxe: Travels in Switzerland and in the country of the Grisons. The fourth edition, London 1801. (Erste Auflage 1778: Sketches on the Natural, Civil and Political State of Switzerland.)

Josef Killer: Die Werke der Baumeister Grubenmann, Zürich, Verlag Leemann, 1941, 1959.

Fritz Stüssi: Schweizerische Pioniere des Brückenbaues, Rektoratsrede ETH, 1949, Zürich, Polygraphischer Verlag AG, 1950.

Fritz Stüssi: Der Baumeister Johann Ulrich Grubenmann. «Industrielle Organisation» 1961.

Die Kirche von Wädenswil. Mit Beiträgen von *A. Hauser, F. Stüssi, A. Reinle, P. Ziegler, H. Höhn, R. Diezinger.* Wädenswil, A. Stutz & Co., 1966.

Adresse des Verfassers: Prof. Dr. *Fritz Stüssi,* Seebucht, 8860 Bäch SZ.

Statische Berechnung eines Seiltragwerkes für Hängebahnen

DK 625.57.001.2

Von Dr.-Ing. **H. Wettstein,** Institut für Bau- und Transportmaschinen der ETH Zürich (Leitung Prof. O. Zweifel)

Der starke Aufschwung, den der Seilbahnbau in den letzten Jahren erfahren hat, legt den Gedanken nahe, diese Bauweise auch für allgemeine Transportanlagen anzuwenden. Sie bietet hauptsächlich folgende Vorteile: Grosse Stützweite, geringer Bedarf an Baugrund und Baustoffen sowie optische Unauffälligkeit. Ihr Nachteil ist die Knickung der Fahrbahn an den Stützen, die nur geringe Geschwindigkeiten zulässt. Diesen Nachteil behebt das von Gerhard Müller, *Dietlikon, vorgeschlagene Seiltragwerk. Es besteht aus zwei Seilsträngen, die nach Art der Fahrdrahtaufhängungen bei elektrischen Bahnen übereinander liegen und durch Vertikalseile miteinander verbunden sind. Die vorliegende Arbeit befasst sich mit der statischen Berechnung dieses Seiltragwerkes und zeigt, welche Massnahmen zu treffen sind, um je nach Wunsch eine gerade, konvexe oder konkave Bahnkurve der Verkehrslast zu erhalten, die mit grosser Geschwindigkeit befahren werden kann. Sie beschränkt sich auf gerade Trassees. Die Berechnung von Kurven ist komplizierter und wurde zurückgestellt. Der Erfinder baute in Schmerikon eine aufwendige Prototypanlage, um die gute Wirkungsweise seines Systems nachzuweisen und um dieses bekanntzumachen.*

Allgemeines

Das hier besprochene Seiltragwerk setzt sich wie bei einer Hängebrücke aus einem Tragseil und einer Fahrbahn zusammen, Bild 1. Die Fahrbahn besteht jedoch nicht wie bei der Hängebrücke aus einem biegesteifen Balken, sondern aus gespannten Seilen F, welche in kurzen Abständen durch vertikale Verbindungsglieder V mit dem Tragseil T verbunden sind. Durch eine geeignet gewählte Verspannung des leeren Tragwerkes kann eine Wanderlast je nach Bedürfnis eine nach oben gekrümmte, eine gerade oder eine nach unten gekrümmte Bahnkurve beschreiben. Bei Fahrgeschwindigkeiten, die gegenüber der Transversalwellengeschwindigkeit der Seile von etwa 200 m/s klein sind, dürften dynamische Einflüsse keine grösseren Probleme aufwerfen, weshalb hier nur statische Berechnungen durchgeführt werden.

Ein wichtiger Grundgedanke dieser Berechnungen sei hier vorangestellt: Geometrie und Belastungen des Seilsystems betrachtet man gefühlsmässig als bekannt. Man ist deshalb versucht, die unbekannten Seilzugkräfte und bei Belastungsänderungen eintretende Deformationen direkt zu berechnen. Weil aber dieses Vorhaben auf Schwierigkeit stösst, geht man besser gerade umgekehrt vor. Man nimmt die Seilkräfte und die innern Verspannkräfte zunächst als bekannt an und berechnet damit die geometrischen Seilformen und Seillängen. Durch geeignetes Verändern dieser Kraftannahmen findet man schliesslich die Lösungen, welche zur gegebenen geometrischen Anordnung passen. Die Berechnungen stützen sich im übrigen weitgehend auf die bekannten Lösungen der Seilstatik [1], [2].

Die Voraussetzungen sollen im folgenden jeweils so formuliert werden, dass die Berechnungsergebnisse exakte Lösungen darstellen. Man vermeidet damit einerseits das unkontrollierte, ständige Verwenden von Näherungslösungen und hat anderseits durch nachträgliches Überprüfen der Voraussetzungen eine klarere Vorstellung von der zu erwartenden Übereinstimmung mit dem wirklichen Bauwerk.

1. Symbolliste

Gewisse nur einmal verwendete Symbole sind hier nicht aufgeführt, da ihre Bedeutung aus dem Text hervorgeht. Im folgenden bedeuten T-Seil = Tragseil, F-Seil = Fahrbahnseil.

a	Vertikalabstand von T- und F-Seilstützpunkt, wenn $a_0 = a_b = a$
a_0/a_b	wie a, am Feldende, wo $x \to 0$ bzw. $x \to b$ (Bild 4)
b	horizontale Feldlänge (Bild 3)
c_F	Feldsehne des Fahrbahnseiles (Bild 4)
c_{F1}	Teilfeldsehne des F-Seiles auf der Seite, wo $x \to 0$
c_{F2}	Teilfeldsehne des F-Seiles auf der Seite, wo $x \to b$
c_T	Feldsehne des Tragseiles (Bild 3)
c_{T1}	Teilfeldsehne des T-Seiles auf der Seite, wo $x \to 0$ (Bild 5)
c_{T2}	Teilfeldsehne des T-Seiles auf der Seite, wo $x \to b$ (Bild 5)
Δc_F	«Überlänge des Sehnenzuges» gleich $c_{F1} + c_{F2} - c_F$ beim F-Seil (Bild 13)
Δc_T	«Überlänge des Sehnenzuges» gleich $c_{T1} + c_{T2} - c_T$ beim T-Seil (Bild 13)
E	E-Modul von Stahl $= 2{,}1 \cdot 10^{10}$ kp/m²
F_F	metallischer Querschnitt (des) der F-Seile(s)
F_T	metallischer Querschnitt (des) der T-Seile(s)
f_M	T-Seildurchhang in Feldmitte bei Seilmontage (Kap. 24.1)
f_V	Länge des Fahrzeuges (Bild 5)
H	Horizontalkomponente der Seilspannkräfte allgemein
H_F	wie H, jedoch Nennwert für F-Seil im Leerfeld (Bild 4)

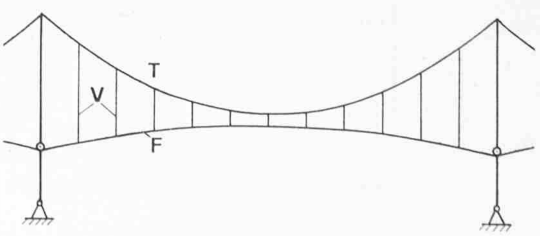


Bild 1. Seiltragwerk, das eine gerade Lastwegkurve von Stütze zu Stütze zu verwirklichen ermöglicht

$\overline{H}_F$	wie H, jedoch Wert für F-Seil im Lastfeld (Bild 5)
H_T	wie H, jedoch Nennwert für T-Seil im Leerfeld (Bild 3)
$\overline{H}_T$	wie H, jedoch Wert für T-Seil im Lastfeld (Bild 5)
h	Höhenunterschied eines Seilfeldes allgemein
h_F	Höhenunterschied des F-Seil-Feldes (Bild 4)
h_{F1}	Höhenunterschied des F-Seil-Teilfeldes auf Seite, wo $x \rightarrow 0$ (Bild 5)
h_{F2}	Höhenunterschied des F-Seil-Teilfeldes auf Seite, wo $x \rightarrow b$ (Bild 5)
h_T	Höhenunterschied des T-Seil-Feldes (Bild 3)
h_{T1}	Höhenunterschied des T-Seil-Teilfeldes auf Seite, wo $x \rightarrow 0$ (Bild 5)
h_{T2}	Höhenunterschied des T-Seil-Teilfeldes auf Seite, wo $x \rightarrow b$ (Bild 5)
$h_V(x)$	Länge des starren Verbindungsgliedes an der Stelle x (Bild 4)
Q	Verkehrslast (Nennwert oder wirklicher Wert, vgl. Bild 5)
Q_F bzw. Q_T	Verkehrslastanteil, der auf F-Seil bzw. T-Seil wirkt
q	Gewicht pro Meter T-Seilsehne des ganzen Tragwerkes (Bild 5)
q_F	Gewicht pro Meter Feldsehne des F-Seiles, Gl. (8)
q_G	Gewicht pro Meter T-Seilsehne der Verbindungsglieder einschliesslich Armaturen, Gl. (8)
q_T	Gewicht pro Meter Feldsehne des T-Seiles, Gl. (1)
q_{TT}	auf T-Seil pro Meter Feldsehne wirkende totale verteilte Last; Nennwert im Leerfeld, vgl. Bild 3
$\overline{q}_{TT}$	auf T-Seil pro Meter Feldsehne wirkende totale verteilte Last; wirklicher Wert im Lastfeld, siehe Gl. (21)
q_V	resultierende Vorlast pro Meter F-Seilsehne (Nennwert im Leerfeld, ist normalerweise negativ, vgl. Bild 4)
$\overline{q}_V$	resultierende Vorlast pro Meter F-Seilsehne (wirklicher Wert im Lastfeld)
$q_{VW}/\overline{q}_{VW}$	auf horizontale Länge bezogene Kraft der Verbindungsglieder am obern Ende/Nennwert im Leerfeld bzw. wirklicher Wert im Lastfeld; Gl. (1) und (22)
s bzw. s_T	Seilbogenlänge allgemein bzw. speziell für T-Seil-Leerfeld; Gl. (3)

Δs_F	Überlänge des Seilbogens gegen Sehne bzw. Sehnenzug für	F-Seil im Lastfeld	Durch sinngemässe Anwendung von Gl. (4) wie Δs_T bzw. Δs_{T0} zu ermitteln
Δs_{F0}		F-Seil im Leerfeld	
Δs_T		T-Seil im Lastfeld	Durch sinngemässe Anwendung von Gl. (4) auf beide Teilfelder zu ermitteln
Δs_{T0}		T-Seil im Leerfeld	nach Gl. (4) oder (4a)

ΔT_F	Temperaturerhöhung Lastfall gegen Leerfall (Kap. 23.4)	im F-Seil
ΔT_T		im T-Seil

u	Höhe der Lastwegkurve über Bezugsniveau (Bild 14)
u_0 bzw. u_b	Höhe der Lastwegkurve über Bezugsniveau am linken ($x = 0$) bzw. rechten ($x = b$) Feldende (Kapital 3)
v	Längskoordinate der Fahrstrecke (Bild 14) bzw. der Geschwindigkeit; Gl. (24)
V_0	resultierende Vertikalkomponente der Stützkraft der Feldseite, wo $x \rightarrow 0$ (Bild 6)
x	horizontale Vermessungskoordinate im Einzelfeld (Bild 3)
x	Horizontalkoordinate der Laststellung (Bild 5)
y	vertikaler Seildurchhang gegen Feldsehne an der Stelle x
y_F bzw. y_T	wie y, jedoch des F-Seiles bzw. des T-Seiles
y_L	Lastdurchhang des T-Seiles an der Stelle x über der Verkehrslast (Bild 6)
α_0 bzw. α_b	Steigungswinkel der Lastwegkurve an den Feldenden $x = 0$ bzw. $x = b$
β	Temperaturausdehnungskoeffizient der Seile ($1{,}17 \cdot 10^{-5} \cdot \text{Grad}^{-1}$)

δ	elastische Seilverlängerung	allgemein	
δ_F		des F-Seiles im Lastfeld	durch sinngemässe Anwendung von Gl.(5) wie δ_T u. δ_{T0} zu ermitteln
δ_{F0}		des F-Seiles im Leerfeld	
δ_T		des T-Seiles im Lastfeld	durch sinngemässe Anwendung von Gl.(5) auf beide Teilfelder zu ermitteln
δ_{T0}		des T-Seiles im Leerfeld nach Gl.(5)	

2. Einzelfeldberechnung

Eine Hängebahnstrecke setzt sich im allgemeinen aus mehreren Einzelfeldern zusammen. Deren Berechnung bildet die Grundlage für den Entwurf einer Strecke. Die Behandlung des Leerfeldes wird hier vorangestellt, da durch sie die Abmessungen des Tragwerkes formelmässig festgelegt werden. Die folgenden rohen Grundgedanken führen zur in Bild 2 dargestellten Gestalt des Tragwerkes: Am relativ stark durchhängenden Tragseil T sind in kurzen, regelmässigen Abständen vertikale Verbindungsseile zum relativ wenig nach oben durchgebogenen Fahrbahnseil befestigt. Alle Verbindungsseile sind gleich gespannt. Das stark gespannte Fahrbahnseil wird an den Stützen von einer Kraft A_F niedergehalten, welche zum Beispiel dem mittleren Fahrzeuggewicht entspricht. Man sieht sofort, dass deswegen bei Fahrzeugdurchfahrt an der Stütze (theoretisch) sich das Seil nicht vertikal verschiebt. Das heisst, die Stützendurchfahrten sollten glatt und ohne «Knick» in der Fahrzeugbahn erfolgen können. Dass diese Bahnkurve sogar zur Geraden werden kann (aber auch irgendeine gewünschte Krümmung annehmen kann), wird später gezeigt.

21. Leerfeld

Durch Berechnung beider Seilkurven kann die nötige Länge der vertikalen Verbindungsseile (im folgenden Verbindungsglieder genannt) als Funktion der Lage im Feld angegeben werden. Die Seilkurven entsprechen den bekannten Parabellösungen, da infolge der Kleinheit des Abstandes der

Verbindungsglieder deren Kraft als gleichmässig auf die Feldsehne verteilt und in jedem Feld konstant angenommen wird. Denn infolge der begrenzten Seilneigung, besonders des Fahrbahnseiles, sind auch alle am Seilsystem angreifenden Gewichte praktisch gleichmässig auf die Feldsehne verteilt. Diese beiden Aussagen sind aber gerade die Voraussetzung für die exakte Gültigkeit der Parabellösungen.

21.1. Tragseilkurve

Es wird ein horizontales oder geneigtes Seilfeld gemäss Bild 3 vorausgesetzt. Die auf das Seil wirkenden, resultierenden Kräfte q_{TT} seien gleichmässig auf die Feldsehne des Tragseiles verteilt und setzen sich zusammen aus

$$(1) \qquad q_{TT} = q_T + \frac{b}{c_T} q_{VW}$$

wobei q_T das auf die Feldsehne bezogene Gewicht des Tragseiles[1]) und q_{VW} die auf die horizontale Feldlänge bezogene, verteilte Kraft der Verbindungsglieder («*V*erbindungs*w*and») am obern Ende darstellen. Die infolge des ausschliesslichen vertikalen Angreifens der Kräfte konstante Horizontalkomponente der Tragseilspannkraft sei mit H_T bezeichnet. Die Tragseilkurve hat damit die dem Seilstatiker schon bekannte Form (vgl. z.B. das Buch von Czitary [2]):

$$(2) \qquad y_T(x) = \frac{x(b-x)}{2\,b} \, \frac{c_T\, q_{TT}}{H_T}$$

21.11. Tragseillänge von Stütze zu Stütze

Nach *Zweifel* [1] Gl. (28) wird mit den hier gebrauchten Symbolen die effektive Seilkurvenlänge s_T durch Gl. (3) gegeben.

$$(3) \qquad s_T \cong \frac{2\,H_T}{q_{TT}} \sqrt{\left(\frac{h_T\, q_{TT}}{2\,H_T}\right)^2 + Sh^2 \left(\frac{b\, q_{TT}}{2\,H_T}\right)}$$

Diese Formel ist unter den hier gemachten Voraussetzungen eine Näherung, da sie für die Kettenlinie (welche hier nicht vorliegt) des Seiles gilt. In einem später zu untersuchenden Montagezustand (Tragseil hängt leer durch) liegt aber doch eine Kettenlinie vor, für welche Gleichung (3) bzw. (4) benötigt werden wird.

Da für die praktische Berechnung immer nur relativ kleine Differenzen von s_T z.B. für verschiedene Werte von H_T oder q_{TT} gebraucht werden, wird von *Zweifel* [1] zur Verbesserung der relativen Genauigkeit die Differenz zur Feldsehne als abgebrochene Reihe angegeben [nach Potenzen von $(b\, q_{TT}/H_T)$ entwickelt]:

$$(4) \qquad \Delta s_{T0} = s_T - c_T \cong \frac{b^2}{24\, c_T} \left(\frac{b\, q_{TT}}{H_T}\right)^2 \cdot \left[1 + \frac{3\, b^2 + 8\, h_T^2}{240\, c_T^2} \left(\frac{b\, q_{TT}}{H_T}\right)^2\right]$$

Dies gilt für die Kettenlinienform des Seiles. Berücksichtigt man die beim Leerfeld eher zutreffende Parabelform, so lässt[2]) sich ebenfalls eine unendliche Reihe für Δs_T angeben, die sich im zweiten Glied von der Reihe nach Gleichung (4) unterscheidet:

$$(4a) \qquad \Delta s_{T0} \cong \frac{b^2}{24\, c_T} \left(\frac{b\, q_{TT}}{H_T}\right)^2 \cdot \left[1 + \frac{3}{80} \left(\frac{5\, h_T^2}{c_T^2} - 1\right) \left(\frac{b\, q_{TT}}{H_T}\right)^2\right]$$

[1]) Dieses ist näherungsweise gleich dem Gewicht pro Meter des Tragseiles.

[2]) Da die Berechnung dieser Reihenglieder auf einem nicht ohne weiteres zu findenden Weg erfolgte, sei dieser für den theoretisch interessierten Leser im Anhang kurz beschrieben.

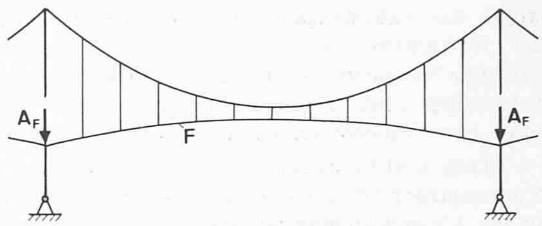


Bild 2. Das Fahrbahnseil wird an den Stützen von einer Kraft A_F niedergehalten

Hier ist, wie auch in Gleichung (4), das zweite Glied bei straffer Seilspannung (d.h. $b\, q_{TT}/H_T \approx 0{,}2$) vernachlässigbar klein.

Ebenso gibt *Zweifel* in [1] die elastische Seilverlängerung δ an:

$$(5) \qquad \delta_{T0} \cong \frac{H_T\, c_T^2}{F_T\, E\, b} \left[1 + \frac{1}{12} \left(\frac{b\, q_{TT}}{H_T}\right)^2\right]$$

Hier sind beide noch angegebenen Glieder sowohl für Parabel als auch für Kettenlinienform des Seiles gültig.

Nun lässt sich die ungespannte Seillänge berechnen:

$$(6) \qquad l_u = c_T + \Delta s_{T0} - \delta_{T0}$$

21.12. Maximale Tragseilspannkraft und Temperatureinfluss

Mit der aus Gleichung (2) bestimmten grössten Seilneigung am obern Feldende ($x = b$) berechnet man die maximale Tragseilspannkraft im Leerfeld:

$$(7) \qquad S_{max} = \frac{H_T}{\cos\gamma} = H_T \sqrt{1 + \left(\frac{h}{b} + \frac{c_T\, q_{TT}}{2\, H_T}\right)^2}$$

Der Temperatureinfluss kann überschlägig[3]) am folgenden Modell diskutiert werden: Ein prismatischer Stahlstab mit konstanter Querschnittsfläche und der Länge 1 erfährt bei einer Temperaturänderung ΔT eine relative Längendehnung von $\Delta l/l = \beta\, \Delta T$. Eine Druckkraft, welche gerade die relative Längendehnung $-\Delta l/l$ bewirkt, d.h. obige Dehnung rückgängig macht, entspricht einer Spannung von $-(\Delta l/l)\, E$. Wird die Längendehnung bei der Temperaturänderung durch starre Endbefestigungen verhindert, so stellt sich natürlich gerade die Spannung

$$\sigma = -\beta\, \Delta T\, E$$

ein oder allgemeiner

$$\Delta\sigma = -\beta\, \Delta T\, E = -12{,}3 \text{ kp/mm}^2,$$

[3]) Genaueres über den Temperatureinfluss ist in Kapitel 23.4 und 24 zu finden.

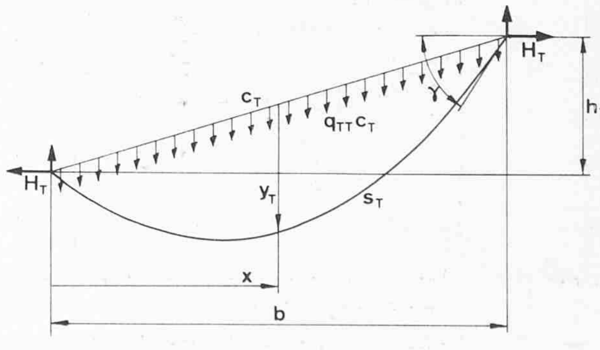


Bild 3. Tragseilkurve im Leerfeld

wobei die Zahlenangabe mit $\beta = 1{,}1 \cdot 10^{-5} \cdot \text{Grad}^{-1}$, $E = 2{,}1 \cdot 10^4\,\text{kp/mm}^2$ für Stahl und $\Delta T = 50°$ erhalten wurde. Wichtige Voraussetzung für diese von verschweissten Eisenbahnschienen her bekannte Überlegung ist die Konstanz des Stab- bzw. Schienenquerschnittes.

Trag- und Fahrbahnseil des Seiltragwerkes erfüllen diese Voraussetzung und sind infolge der gegenseitigen Verspannung in der Längendehnung wie die Eisenbahnschiene behindert. Deshalb kann als temperaturbedingte Schwankungsbreite der Seilspannung etwa der oben ermittelte Wert betrachtet werden.

21.2. Fahrbahnseilkurve

Es wird ein horizontales oder geneigtes Seilfeld gemäss Bild 4 vorausgesetzt. Die auf das Fahrbahnseil wirkende resultierende, auf der Feldsehne gleichmässig verteilte Kraft q_V lautet mit dem Gewicht pro Meter der Fahrbahn q_F:

$$(8) \qquad q_V \cong q_F - \left(\frac{b}{c_F}\, q_{VW} - \frac{c_T}{c_F}\, q_G\right)$$

Sie ist normalerweise negativ, was eine Krümmung der leeren Fahrbahn nach oben (konvex wie in Bild 4) zur Folge hat.

Anhand des Begriffes q_V, den man etwa als Vorlast bezeichnen könnte, hat sich die Idee des hier beschriebenen Tragwerkes folgendermassen entwickelt. Die Gleichgewichtsbedingung für die Vertikalkomponenten am Fahrbahnseil fordert bei mehreren gleichartigen Feldern an jeder Stütze eine Niederhaltekraft von $q_V\, c_F$, welche natürlich gleich der Verkehrslast gewählt werden kann. Damit bewegt sich die Fahrbahn bei der Stützendurchfahrt nicht, weil die Niederhaltekraft dabei einfach durch die Verkehrslast ersetzt wird. Erst diese Idee, dass nämlich mit diesem Seiltragwerk die bei Seilbahnen unangenehme Stützenüberfahrt vermieden wird, gab den Anstoss zur Ausarbeitung der vorliegenden verfeinerten Berechnung.

Wenn die Horizontalkomponente der Fahrbahnspannkraft mit H_F bezeichnet wird, lautet die Seilkurve

$$(9) \qquad y_F = \frac{x\,(b - x)}{2\,b}\;\frac{c_F\, q_V}{H_F}$$

Unter der oben erwähnten Voraussetzung, nämlich dass q_V unabhängig von x sei, gilt dies genau. Infolge der Gestrecktheit des Fahrbahnseiles, welches den grössten Gewichtsanteil am Tragwerk hat, ist die Voraussetzung hier durch gleiche Belastung aller Verbindungsglieder, das heisst durch Konstanthaltung von q_{VW}, leicht einzuhalten.

21.3. Länge der Verbindungsglieder

Nach Bild 4 können nun die Längen der Verbindungsglieder h_V als Funktion von x angegeben werden, wobei im Rahmen dieser grundlegenden Betrachtung auf eine Aufteilung in einzelne Glieder verzichtet wird.

Im häufigen Spezialfall gleicher Stützenhöhen ist $a_0 = a_b = a$, und nach Gleichung (2) und (9) wird

$$(10) \qquad h_V(x) = a - y_T + y_F = a - \frac{x(b - x)}{2\,b} \cdot \left[\frac{q_{TT}\, c_T}{H_T} - \frac{q_V\, c_F}{H_F}\right]$$

Im allgemeineren Fall von variablen Stützenhöhen ist $a_0 = a \neq a_b$, und nach Bild 4 wird

$$(11) \qquad h_V(x) = a - (h_F - h_T)\,\frac{x}{b} - \frac{x\,(b - x)}{2\,b} \cdot \left[\frac{q_{TT}\, c_T}{H_T} - \frac{q_V\, c_F}{H_F}\right]$$

22. Lastfeld

Durch die Einfahrt eines Wagens, der hier als selbstfahrend betrachtet werde, ändern sich die Seilspannkräfte. Diese Änderungen hängen von den Eigenschaften der Seilverankerungen und der Laststellung ab. Die Horizontalkomponenten der neuen Seilspannkräfte für eine Laststellung x nach Bild 5 seien mit $\overline{H}_T$ und $\overline{H}_F$ bezeichnet. Um hier weiterzukommen, sei vorweggenommen, dass im allgemeinen infolge der Elastizitäten des Systems der angrenzenden Felder die Seilzugkräfte sich nur relativ wenig verändern. Diese Bemerkung bezieht sich auch auf deren Horizontalkomponenten, da die Änderungen der Durchhänge und damit auch der Seilwinkel relativ klein sind und auch weil die vorgesehenen Pendelstützen keine Differenz der Horizontalkomponenten zum Nachbarfeld zulassen würden. $\overline{H}_T$ und $\overline{H}_F$ sollen deshalb bis zur Durchführung einer verfeinerten Betrachtung in Kap. 23.4 als bekannt gelten. Auch der Temperatureinfluss soll erst dort genauer berücksichtigt werden.

22.1. Lastwegkurve

Man trifft hier die folgenden Annahmen: Das Gewicht Q der Verkehrslast ist auf die horizontale Länge $f_V\, b/c_F$ gleichmässig verteilt. Die Horizontalkomponenten der Seilkräfte $\overline{H}_F$ und $\overline{H}_T$ seien bekannt. Alle Verbindungsglieder hängen vertikal. Das Gesamtgewicht des Tragwerkes sei gleichmässig längs

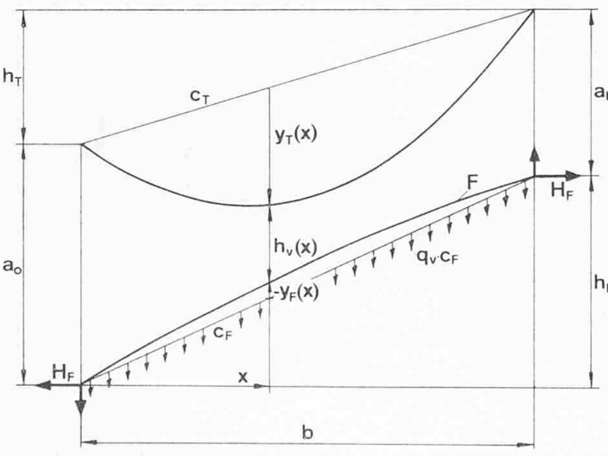


Bild 4. Fahrbahnseilkurve F im Leerfeld

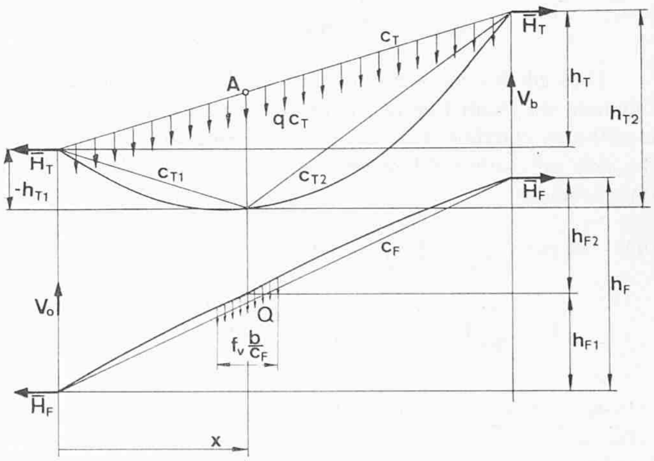


Bild 5. Am Tragwerk angreifende Kräfte

der Feldsehne des Tragseiles verteilt und beträgt pro Längeneinheit:

$$(12)\quad q = q_T + q_G + q_F \frac{c_F}{c_T}$$

Bildet man mit (12) und (1) den Ausdruck $c_T/c_F\,(q - q_{TT})$, so erhält man nach (8) gerade q_V. Diese Beziehung

$$(13)\quad q_V = \frac{c_T}{c_F}(q - q_{TT})$$

wird später benötigt.

Zunächst soll nun durch Formulieren der Gleichgewichtsbedingungen am ganzen Tragwerk (Bild 5) die Vertikalkomponente der linken Stützkraft beider Seile berechnet werden [Gl. (14)]:

Momentenbedingung bezüglich Punkt A (Bild 5, positiv = im Uhrzeigersinn):

$$V_0\,x - V_b\,(b - x) + \overline{H}_T\,h_T + \overline{H}_F\,h_F + q\,c_T\left(\frac{b}{2} - x\right) = 0$$

Komponentenbedingung vertikal:

$$V_b = Q + q\,c_T - V_0$$

V_b aus beiden Gleichungen eliminieren und nach V_0 auflösen ergibt:

$$(14)\quad V_0 = Q\left(1 - \frac{x}{b}\right) + \frac{q\,c_T}{2} - \frac{\overline{H}_T\,h_T + \overline{H}_F\,h_F}{b}$$

Am linken Teil des in der Mitte der Fahrzeugstellung zerschnitten gedachten Tragwerkes wird nun eine Momentengleichgewichtsbedingung bezüglich A formuliert (Bild 6), welche die Berechnung der Lastwegkurve ermöglichen wird:

$$y_L(\overline{H}_T + \overline{H}_F) = (\overline{H}_T + \overline{H}_F)\frac{x\,h_T}{b} + \overline{H}_F\,\{a_0 - h_V(x)\} + V_0\,x - q\frac{c_T\,x^2}{2b} - Q\frac{f_V\,b}{8\,c_F}$$

Nun setzt man $h_V(x)$ nach Gl. (11) und V_0 nach Gl. (14) ein, berücksichtigt (13) und löst nach y_L auf. Bildet man schliesslich $h_V(x) + y_L(x)$, so hat man eine formelmässige Darstellung der Fahrzeugbahnkurve (Lastwegkurve)[4]) gewonnen (vgl. Bild 7):

$$(15)\quad h_V(x) + y_L(x) = \frac{x - (x^2/b)}{2\,(\overline{H}_T + \overline{H}_F)}\cdot \left[q_V\,c_F\left(1 + \frac{\overline{H}_T}{H_F}\right) + q_{TT}\,c_T\left(1 - \frac{\overline{H}_T}{H_T}\right) + 2\,Q\right] + x\frac{h_T - h_F}{b} + a_0 - \frac{Q\,f_V\,b}{8\,c_F\,(\overline{H}_T + \overline{H}_F)}\ ^{5)}$$

Da q_V negativ sein kann und im allgemeinen auch negativ ist, kann der Koeffizient von x^2 verschwinden. Damit wird aber die Fahrbahn für das Fahrzeug zur Geraden. Diese nützliche Eigenschaft des Tragwerkes wird noch ergänzt durch die Möglichkeit, innerhalb gewisser Grenzen die Lastwegkurve je nach der Wahl von q_V sowohl nach oben (konvex) als auch nach unten (konkav) zu krümmen. Dadurch können auch Gefällsänderungen mit den einer hohen Fahrgeschwindigkeit angemessenen Ausrundungsbögen verwirklicht werden. Die für einen glatten Übergang von Feld zu Feld notwendigen Bedingungen können nun aus Gl. (15) gewonnen werden, wobei $f_V/c_F \approx 0$ angenommen werden darf.

[4]) Ein vom Bisherigen unabhängiger Weg zur Ermittlung der Lastwegkurve als F-Seildurchhang ergibt sich aus der später durchgeführten Berechnung der verteilten Belastung der Verbindungsglieder neben (Gleichung 22) und über (Gleichung 23) der Verkehrslast.

[5]) Wird das letzte Glied mit berücksichtigt, so ist die Gültigkeit dieser Gleichung beschränkt auf

$$\frac{f_V}{2}\frac{b}{c_F} < x < b - \frac{f_V}{2}\frac{b}{c_F}$$

22.2. Bedingungen für einen glatten Übergang zu den Nachbarfeldern bei idealer Gewichtsspannung

Vom als gerade oder gekrümmt angenommenen vertikalen Längenprofil des Bahntrassees wird man die Neigungen $\mathrm{tg}\,\alpha_0$, $\mathrm{tg}\,\alpha_b$ in den beiden Fahrbahnseilstützpunkten kennen. Zur Vereinfachung werden die Seilkraftkomponenten $\overline{H}_T = H_T$ und $\overline{H}_F = H_F$ als unabhängig von der Laststellung angenommen (ideale Gewichtsspannung). Die Neigungstangens der Lastwegkurve berechnet man aus Gl. (15) als negative Ableitung nach x und durch Addieren der Neigung der Tragseilfeldsehne h_T/b:

$$(16)\quad \mathrm{tg}\,\alpha = \left[\frac{q_V\,c_F}{2\,H_F} + \frac{Q}{H_T + H_F}\right]\left(2\frac{x}{b} - 1\right) + \frac{h_F}{b}$$

In den Endpunkten des Feldes ist $x = 0$ bzw. $x = b$, und man erhält folgende zwei Bedingungen für den glatten Anschluss:

$$\mathrm{tg}\,\alpha_0 = -\,q_V\frac{c_F}{2\,H_F} - \frac{Q}{H_T + H_F} + \frac{h_F}{b}$$

$$\mathrm{tg}\,\alpha_b = \quad q_V\frac{c_F}{2\,H_F} + \frac{Q}{H_T + H_F} + \frac{h_F}{b}$$

Dies ist ein lineares Gleichungssystem für die als unbekannt betrachteten Ausdrücke $q_V \cdot c_F/2\,H_F$ und h_F/b, welche nun berechnet werden können:

$$(17)\quad \begin{cases} q_V\dfrac{c_F}{2\,H_F} = \dfrac{1}{2}\,[\mathrm{tg}\,\alpha_b - \mathrm{tg}\,\alpha_0] - \dfrac{Q}{H_T + H_F} \\[2ex] \dfrac{h_F}{b} \qquad = \dfrac{1}{2}\,[\mathrm{tg}\,\alpha_0 + \mathrm{tg}\,\alpha_b] \end{cases}$$

Damit sind q_V und h_F aus den übrigen in diesen Beziehungen vorkommenden Grössen, welche alle bekannt sind, bestimmbar. Mit der später anzugebenden Gleichung (18) erhält man die verteilte Kraft q_{VW} in den Verbindungsgliedern, welche im ganzen Feld konstant ist.

Sollten sich technisch unrealistische Werte ergeben, so haben die Werte von $\mathrm{tg}\,\alpha_0$ und $\mathrm{tg}\,\alpha_b$ einen zu grossen Unter-

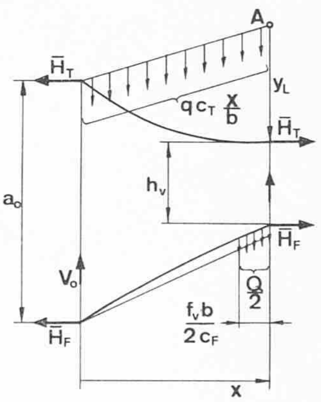


Bild 6. Am linken Tragwerkteil angreifende Kräfte

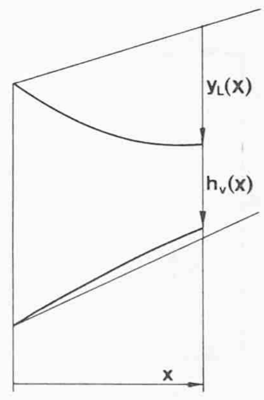


Bild 7. Koordination für die Darstellung der Lastwegkurve nach Gleichung (15)

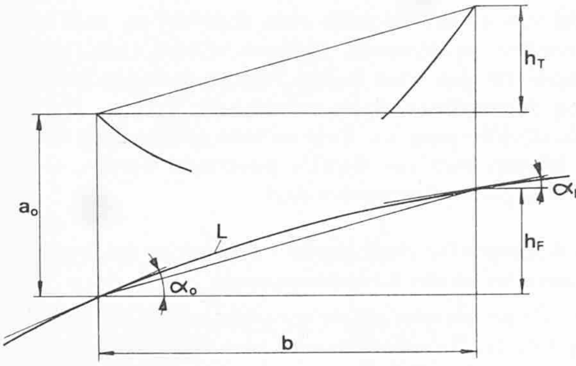


Bild 8. Das Einzelfeld kann einem vorgegebenen, schwach gekrümmten Längenprofil L folgen.

schied, und die Lösung muss vielleicht in festen Ablenkbauwerken gesucht werden.

Die zweite Bedingung (17) wird von jeder parabelförmigen Lastwegkurve von selbst erfüllt, so dass man die Konstruktion eines Längenprofils mit der Zusammensetzung einer Lastwegkurve aus Geraden und Parabelstücken beginnen kann. Dies ist in Kapitel 3 durchgeführt.

Der Höhenunterschied der Tragseilstützpunkte h_F braucht hier keine Bedingung zu erfüllen. Praktisch muss er aber so gewählt werden, dass das Tragseil in der Feldmitte nicht unter das Fahrbahnseil gerät.

22.3. Diskussion einiger Verallgemeinerungen

Bisher wurde q_V innerhalb eines Feldes als konstant angenommen. Wenn das Längenprofil aus irgendwelchen Gründen Wendepunkte aufweisen muss, so kann diese Annahme auch entfallen. Ein Vorgehen, das analog wie in 22.1 ist, würde auch hier die Berechnung der Lastwegkurve ermöglichen.

Schwieriger wäre die Berechnung von Kurvenstrecken, für welche die Verbindungsglieder schräg hängen würden. Das ganze Tragwerk würde dann nicht mehr in einer Ebene liegen. Zur Vermeidung von Schwingungen müssten auch Übergangsbogen mit langsam zunehmender Krümmung eingefügt werden. Solche Übergangsbogen bilden sich bei nicht unterbrochener Führung des Tragseiles aus statisch-geometrischen Gründen von selbst. Ihre Berechnung ist aber hier nicht weiter ausgeführt. Natürlich kann man auch feste Kurvenbauwerke vorsehen, welche für kleine Ablenkwinkel auch bei

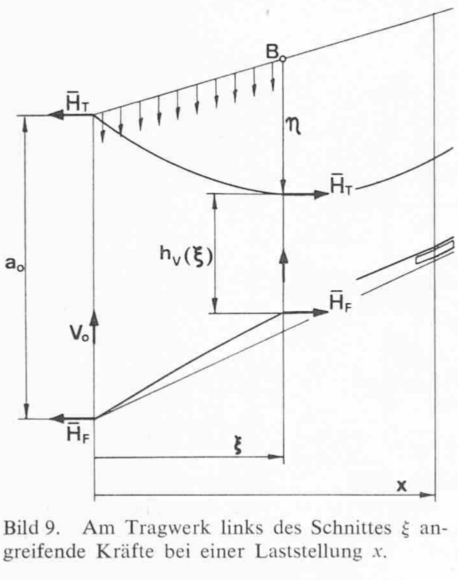


Bild 9. Am Tragwerk links des Schnittes ξ angreifende Kräfte bei einer Laststellung x.

grossen Kurvenradien nicht allzu lang würden. Auch dies wird hier nicht weiter behandelt.

23. Belastung der Verbindungsglieder

Um die Verbindungsglieder zu bemessen, ist der zeitliche Verlauf ihrer Belastung zu ermitteln. Im leeren Feld entspricht die Belastung am oberen Ende dem konstanten Wert q_{VW} einer gleichmässig auf die horizontale Länge verteilten, vom Tragseil ausgeübten Kraft. Diese ist durch die konstruktiven Annahmen nach Kapitel 21.1 als konstant im ganzen Feld festgelegt und beträgt nach Gleichung (1):

$$(18) \quad q_{VW} = \frac{c_T}{b}(q_{TT} - q_T)$$

Die Belastungen, welche durch das Einfahren eines Fahrzeuges in das betrachtete Feld entstehen, werden im folgenden berechnet.

23.1. Belastung der Verbindungsglieder nicht über der Verkehrslast

Vorerst soll die Tragseilkurve für eine beliebige Stellung x der Verkehrslast Q berechnet werden. Aus ihrer Krümmung kann dann leicht auf die totale Belastung des Tragseiles geschlossen werden. Durch Subtraktion seines Eigengewichtes erhält man die Kraft in den wie bisher als gleichmässig verwischt gedachten Verbindungsgliedern $\bar q_{VW}$. Diese muss mindestens vorläufig als von Ort und Laststellung abhängig betrachtet werden.

Für die Stellung x der Verkehrslast nach Bild 9 haben sich neue Seilkräfte eingestellt, deren Horizontalkomponenten wie in Kap. 22 mit $\bar H_T$ (Tragseil) und $\bar H_F$ (Fahrbahn) bezeichnet seien. Man setzt hier auch noch voraus, dass die Verbindungsglieder starr sind und nur Vertikalkräfte übertragen. Der Durchhang η an der in Bild 9 mit ξ bezeichneten Stelle kann nun mittels einer Momentengleichgewichtsbedingung bezüglich Punkt B für das links vom gedachten Schnitt ξ befindliche Seilsystem berechnet werden (Uhrzeigersinn positiv):

$$(19) \quad \bar H_T \left[\xi \frac{h_T}{b} - \eta\right] + \bar H_F \left[\xi \frac{h_T}{b} + a - \{\eta + h_V(\xi)\}\right] + $$
$$+ V_0 \xi - q \frac{c_T}{b} \frac{\xi^2}{2} = 0$$

Dabei ist q das Gesamtgewicht pro Meter des Tragwerkes nach Gl. (12). V_0 ist nach Gl. (14) nur von der Laststellung x und nicht vom Ort ξ abhängig. Die Länge des Verbindungsgliedes h_V an der Stelle ξ erhält man aus Gl. (11), indem x durch ξ ersetzt wird. Setzt man also (11) und (14) in (19) ein und löst nach η auf, so erhält man mit (13) eine Beziehung von der Form

$$(20) \quad \eta = - \frac{c_T \bar H_F}{2\,b\,(\bar H_T + \bar H_F)} \left[q_{TT} \left(\frac{1}{H_T} + \frac{1}{H_F}\right) + \right.$$
$$\left. + q \left(\frac{1}{\bar H_F} - \frac{1}{H_F}\right)\right] \xi^2 + \{\ldots\}\, \xi$$

wobei der Ausdruck in der geschweiften Klammer nicht weiter benötigt wird. Da die das Gleichgewicht ausdrückende Differentialgleichung einer Seilkurve allgemein die Form

$$\frac{d^2\eta}{d\xi^2} = - \frac{\bar q_{TT}\,(c_T/b)}{\bar H_T} = - \frac{\text{auf Horizontalprojektion bezogene Belastung abhängig von } \xi}{\text{Horizontalkomponente der Zugkraft}}$$

hat, ist die verteilte Last durch

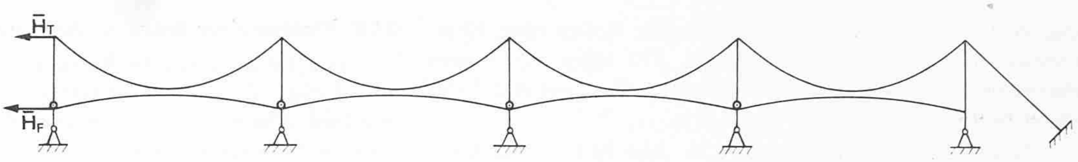


Bild 10. Eine längere Strecke, welche durch Pendelstützen, wie hier skizziert, getragen wird, wirkt auf das betrachtete Feld links wie eine weiche Spannfeder

$$(21)\quad \bar q_{TT} = -\frac{b}{c_T}\,\bar H_T\,\frac{d^2\eta}{d\xi^2} = \frac{1}{(1/\bar H_T)+(1/\bar H_F)}\cdot \left[q_{TT}\left(\frac{1}{H_T}+\frac{1}{H_F}\right)+q\left(\frac{1}{\bar H_F}-\frac{1}{H_F}\right)\right]$$

gegeben. Sie ist unabhängig von ξ und hat auch rechts von der Verkehrslast, d.h. für $x < \xi < b$, denselben Wert, da ja das Vorzeichen der Feldhöhe in Gl. (21) nicht auftritt. Man kann nun mit der Bezeichnung $\bar q_{VW}$ für die Belastung der Verbindungsglieder

$$\bar q_{TT}\,\frac{c_T}{b} = \bar q_{VW} + q_T\,\frac{c_T}{b}$$

setzen, was mit Gleichung (21) die gesuchte Kraft in den Verbindungsgliedern liefert:

$$(22)\quad \bar q_{VW} = \frac{c_T}{b}\left\{\frac{1}{(1/\bar H_T)+(1/\bar H_F)}\cdot \left[q_{TT}\left(\frac{1}{H_T}+\frac{1}{H_F}\right)+q\left(\frac{1}{H_F}-\frac{1}{H_F}\right)\right]-q_T\right\}$$

Bei idealer Gewichtsspannung der Seile, d.h. $\bar H_T = H_T$ und $\bar H_F = H_F$, reduziert sich Gl. (22) auf

$$(22a)\quad \bar q_{VW} = \frac{c_T}{b}\left\{q_{TT} - q_T\right\}$$

was überraschenderweise nach Gl. (18) gerade dem Wert im leeren Feld entspricht. Da bei einer Fahrbahnkonstruktion mit pendelnden Stützen gemäss Bild 10 die anschliessende, oft kilometerlange Strecke wie eine weiche Feder wirkt, ist die Voraussetzung der Konstanz der Seilkräfte praktisch häufig erfüllt, und die einfache Bedingung (22a) wird genügen.

Ebenso bemerkenswert ist die Tatsache, dass $\bar q_{VW}$ nicht von ξ abhängt, also nicht etwa in der Nähe des Fahrzeuges anzusteigen beginnt. Dies ist durch die ausschliessliche Berücksichtigung quadratischer Parabelformen für Seilkurven und Verbindungsgliedlängen bedingt. Die Elastizität der Verbindungsglieder wird natürlich eine Erhöhung von $\bar q_{VW}$ in unmittelbarer Fahrzeugnähe verursachen, welche aber nicht weiter stört, da dadurch der über dem Fahrzeug auftretende Maximalwert von $\bar q_{VW}$ nur verkleinert werden kann.

23.2. Belastung der Verbindungsglieder über der Verkehrslast

Die Verkehrslast sei wie ein «feingliedriger Wurm», dessen Gewicht gleichmässig auf der Länge f_V verteilt ist. Gl. (19) ist für eine Stelle ξ über der Verkehrslast, d.h. für

$$x - \frac{f_V\,b}{2\,c_F} \leqslant \xi \leqslant x$$

um das unterstrichene Glied zu ergänzen

$$(19a)\quad \bar H_T[\ldots] + \ldots - q\,\frac{c_T}{b}\,\frac{\xi^2}{2} - \underline{\frac{Q\,c_F}{2 f_V\,b}\left\{\xi - \left(x - \frac{f_V\,b}{2\,c_F}\right)\right\}^2} = 0$$

welches das Moment des links von B stehenden Wagenteiles darstellt. Damit ändert sich in Gleichung (20) der Koeffizient von ξ^2 um

$$-\frac{Q\,c_F}{2 f_V\,b}\,\frac{1}{\bar H_T + \bar H_F}$$

und $\bar q_{VW\ddot U}$, d.h. die Kraft der Verbindungsglieder über dem Fahrzeug, wird

$$(23)\quad \bar q_{VW\ddot U} = \bar q_{VW} + \frac{\bar H_T}{\bar H_T + \bar H_F}\,\frac{Q\,c_F}{f_V\,b}\quad [\bar q_{VW} \text{ nach Gl. (22)}]$$

Die Verbindungsglieder werden demnach nicht, wie man erwarten könnte, durch das ganze Fahrzeuggewicht zusätzlich belastet, sondern lediglich durch den Bruchteil $\bar H_T/(\bar H_T + \bar H_F)$ davon, welcher die Grössenordnung $1/2 \ldots 1/4$ haben wird. Diese Zusatzbelastung wird um so kleiner, je höher die Fahrbahnseilspannung ist. Ausserdem wirkt auch die Elastizität der Verbindungsglieder eher verkleinernd auf $\bar q_{VW\ddot U}$. Der zeitliche Verlauf der Verbindungsgliedbelastung stellt sich somit als eine stufenartige Erhöhung über der Ruhelast im Moment der Fahrzeugdurchfahrt dar.

Wie sich dieses Resultat bei Weglassung der Voraussetzungen der Starrheit und der gleichmässigen Verteilung der Verbindungsglieder darstellt, zeigt das Ergebnis einer Messung an der Versuchsanlage:

Feldlänge $b = 180$ m; Seilzugkräfte am Bahnende gemessen $H_T = 20{,}6$ Mp; $H_F = 73{,}4$ Mp; Abstand der Verbindungs-

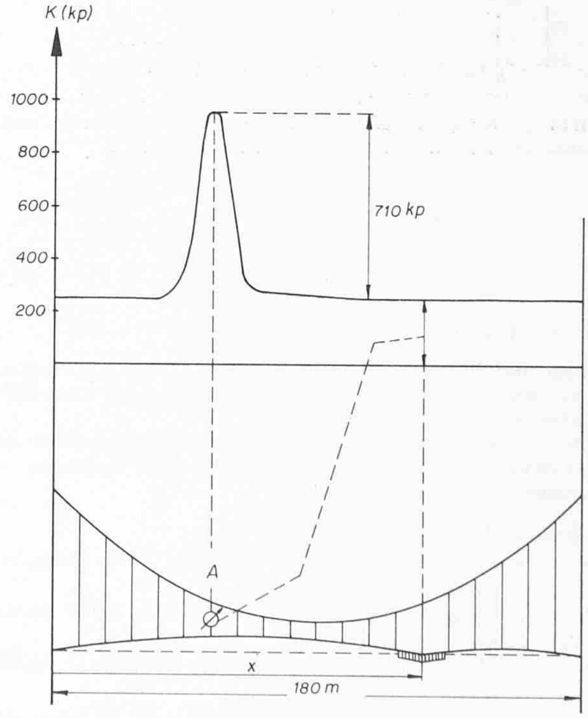


Bild 11. Gemessene Kraft K im Verbindungsglied A in Funktion der Wagenstellung x. Der Abstand der Verbindungsglieder beträgt rund 9 Meter.

glieder 9 m; Fahrzeuglänge über äusserste Rollen rund 10 m; Gewicht pro Meter des Fahrzeuges 370 kp/m; gemessene maximale Krafterhöhung im Verbindungsglied auf den Laufmeter bezogen, aus Bild 11, 78,8 kp/m.

Nach Gl. (23) erhielte man $370 \cdot 20{,}6/73{,}4 + 20{,}6$ kp/m $= 81$ kp/m. Die Übereinstimmung der letzten beiden Werte ist so gut, dass man sie fast zufällig nennen könnte.

23.3. Belastung der Verbindungsglieder bei Gefällsänderungen

Wenn die Bedingung starrer Verbindungsglieder erfüllt bleibt, so bleiben auch die oben gemachten Überlegungen betreffend die Belastungsänderungen in vertikal gekrümmten Profilen richtig. Denn es wurden diesbezüglich keine Voraussetzungen gemacht. Dagegen ist natürlich die statische Belastung q_V im Leerfeld entsprechend den Bedingungen für glatten Anschluss an die Nachbarfelder in Kap. 22.2 anzupassen.

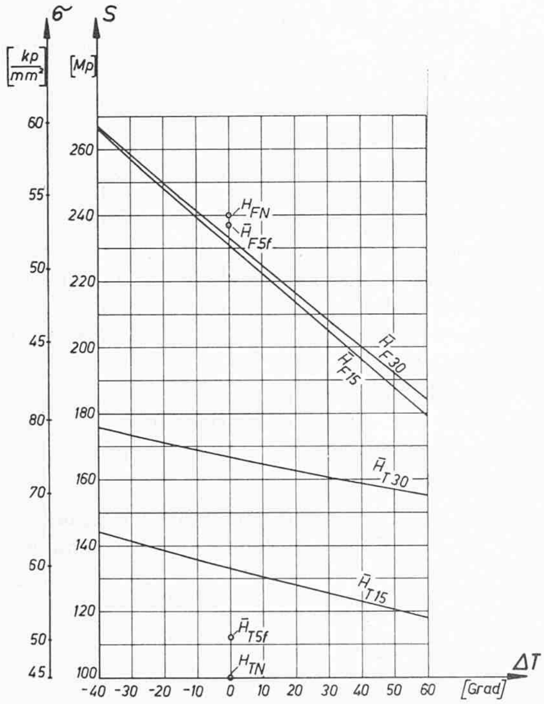


Bild 12. Seilspannkräfte in Funktion der Temperatur bei fester Verankerung an den Feldenden. Daten des Feldes:

$b = 200$ m; $x = 100$ m;
$H_T = 100$ Mp; $H_F = 240$ Mp;
$h_T = 10$ m; $h_F = 8$ m;
$q_T = 19$ kp/m; $q_F = 38$ kp/m; $q_G = 14{,}7$ kp/m;
$F_T = 2 \cdot 11{,}15$ cm²; $F_F = 4 \cdot 11{,}15$ cm²;
Vorlast $q_v = -105{,}8$ kp/m;

Reduktionsfaktor für E-Modul infolge Verseilung 0,8; Nennverkehrslast, welche bei Gewichtsspannung eine Gerade als Lastwegkurve ergeben würde: $Q = 15$ Mp.
Bemerkenswert ist, dass die Tragseilkraft auf Verkehrslaständerungen empfindlicher und auf Temperaturänderungen weniger empfindlich reagiert als die Fahrbahnseilkraft

Symbolerklärung:

σ = Zugspannung im Seil
s = Horizontalkomponente der Seilzugkraft
H_{FN} = Nennwert H_F im Leerfeld
$\bar{H}_{F5F}$ = $\bar{H}_F$ für 5fache Elastizität bei 15 Mp Verkehrslast
$\bar{H}_{F30}$ = $\bar{H}_F$ für 30 Mp Verkehrslast
$\bar{H}_{F15}$ = $\bar{H}_F$ für 15 Mp Verkehrslast
$\bar{H}_{T30}$ = $\bar{H}_T$ für 30 Mp Verkehrslast
$\bar{H}_{T15}$ = $\bar{H}_T$ für 15 Mp Verkehrslast
$\bar{H}_{T5F}$ = $\bar{H}_T$ für 5fache Elastizität bei 15 Mp Verkehrslast
H_{TN} = Nennwert H_T im Leerfeld

23.4. Einfluss einer festen Abspannung an beiden Feldenden

Erst die Kenntnis der Seilzugkräfte unter Last erlaubt, die Belastungen der Verbindungsglieder nach Gl. (23) genau anzugeben. Abgesehen davon interessiert man sich auch für die Seilzugkräfte selbst. Diese sind für den Extremfall der festen Abspannung der Seile an beiden Feldenden zu erwarten. Je elastischer (bzw. weicher) die Seilverankerungen an den Feldenden sind, um so mehr nähern sich diese grössten Seilzugkräfte den Minimalwerten, welche durch die Voraussetzung ihrer Konstanz (Gewichtsspannung) trivialerweise gegeben sind. Die bisher hergeleiteten Beziehungen werden für den Fall fester Verankerung nicht etwa unnötig. Sie erlauben aber nur die Berechnung weiterer Daten (z.B. Durchhänge, Seillängen usw.), wenn die Seilspannkräfte gegeben sind. Diese sind jetzt unbekannt, und dafür kennt man die auf spannkraftlosen Zustand umgerechneten Seillängen. Man wird daher versuchen, durch ein Iterationsverfahren mit wiederholt zu korrigierenden Kraftannahmen die Lösung zu finden. Ein zweckmässiges Vorgehen (für Seilbahnen) wird von *Zweifel* [1] beschrieben: Mit jeder Kraftannahme berechnet man die auf spannungskraftlosen Zustand umgerechneten Seillängen und schliesst damit auf eine zugehörige Temperaturdifferenz zwischen Lastfall und Leerfall. Der Temperatureinfluss muss ja ohnehin diskutiert werden, und man erhält von jeder Durchrechnung der Formelsysteme ein brauchbares Ergebnis.

Da das hier besprochene Seiltragwerk aber zwei Seile aufweist, sind zwei Seilkraftannahmen zu treffen. Durch Festhalten der einen und iterative Verbesserung der andern, bis die für beide Seile wie oben berechneten Temperaturen fast gleich gross geworden sind, gewinnt man ein brauchbares Resultat. Solche Temperaturkurven sind in Bild 12 als Resultat eines durchgerechneten Beispieles dargestellt.

Weil die solcherart durchzuführende Berechnung durchwegs auf den bisher bekannten Formeln beruht, diese aber in ausgiebiger und wiederholter Weise benutzt werden, soll das Vorgehen hier nur anhand des Flussdiagramms Bild 13 beschrieben werden. Dieses entspricht dem Computerprogramm, mit welchem Bild 12 berechnet wurde, und beschreibt nur dessen wichtigste Operationen. Das Flussdiagramm könnte natürlich auch als Orientierungshilfe für eine Handrechnung benutzt werden, die aber einen beträchtlichen Zeitaufwand erfordern würde. Besonders gilt dies für die iterative Verbesserung der Fahrbahnseil-Lastannahme, welche meistens etwa 2 bis 5 Schritte erfordert. Bei jedem Verbesserungsschritt sind sämtliche Lasten, Durchhänge, Teilfelddaten und Überlängen neu zu ermitteln, um schliesslich die beiden Seiltemperaturen berechnen zu können. Erst wenn diese ungefähr übereinstimmen, kann die Iteration abgebrochen werden, und man hat zu einer gegebenen Verkehrslast die Seilkräfte bei einer bestimmten Temperatur ermittelt.

Mit den vorhandenen Beziehungen lässt sich durch sinngemässes Zusammenzählen der Seilüberlängen von mehreren zusammenhängenden Feldern auch dieser Fall bearbeiten. Sollten die Seile auf pendelnden Stützen befestigt sein (Feldsehne veränderlich), so kann nach *Zweifel* [1], Abschnitt 7, vorgegangen werden, wo die Berechnung für ein Seil beschrieben ist. Mit den Gleichungen (22) und (23) können sowohl die verteilten als auch die punktförmigen Belastungen beider Seile angesetzt werden, worauf man die beiden Seiltemperaturen analog wie für ein Seil berechnet.

24. Montagezustände

Von den bei der Montage auftretenden Lastfällen wird hier lediglich als Beispiel einer der wichtigeren behandelt.

24.1. Einpassen des leeren Tragseiles

Das Tragseil soll leer in der «richtigen Länge» eingehängt werden. Zur Kontrolle wird deshalb ein Montagedurchhang in der Feldmitte f_M vorausberechnet, welcher dann entsprechend der bei der Montage herrschenden Temperatur einzustellen ist. Man bezeichnet die Daten des erwähnten Montagezustandes mit dem Index M und diejenigen eines Nennzustandes des Leerfeldes mit dem Index 0. Also für

Montagezustand: q_T, H_{TM}, Δs_M, δ_M, T_M
Nennzustand: q_{TT}, H_T, Δs_0, δ_0, T_0

Im Montagezustand ist durch entsprechende Verankerung der Stützen dafür zu sorgen, dass die Feldsehne c genau gleich lang wie im Nennzustand ist. Nun ist auf Grund der Erhaltung der ungespannten Seillängen beim Übergang vom Montagezustand zum Nennzustand das folgende Berechnungssystem zusammengestellt worden:

$\left.\begin{matrix}\Delta s_0\\ \delta_0\end{matrix}\right\}$ sind nach den Gleichungen (4a) und (5) zahlenmässig zu berechnen

T_0 ist entsprechend den klimatischen Verhältnissen festzulegen

ε ist eine Hilfsgrösse für die Kraftannahme im Montagezustand. Für einige Werte von ε (erfahrungsgemäss etwa $1 < \varepsilon < 1{,}7$) ist das folgende Formelschema durchzurechnen:

$$H_{TM} = \varepsilon \, H_T \frac{q_T}{q_{TT}}$$
Kraftannahme für den Montagezustand

$$f_M = \frac{b \, c_T}{8} \, \frac{q_T}{H_{TM}}$$
Mittendurchhang bei Montage

$$\Delta s_M \cong \frac{b^4 q_T{}^2}{24 c_T H_{TM}{}^2} \left[1 + \frac{3 b^2 + 8 h_T{}^2}{240 \, c_T{}^2} \left(\frac{b \, q_T}{H_{TM}}\right)^2\right]$$
Gl. (4) für die Montagezustandsgrössen

$$\delta_M \cong \frac{H_{TM} \, c_T{}^2}{F_T E b} \left[1 + \frac{1}{12} \left(\frac{b \, q_T}{H_{TM}}\right)^2\right]$$
Gl. (5) für die Montagezustandsgrössen

$$T_M = T_0 + \frac{\Delta s_M - \delta_M - \Delta s_0 + \delta_0}{(c + \Delta s_0 - \delta_0) \, \beta}$$
Aus der Seillängenänderung ermittelte Temperatur bei der Montage

Damit hat man eine ganze Reihe von zusammengehörigen Werten für H_{TM}, f_M und T_M ermittelt. Es ist empfehlenswert, f_M als Kurve in Funktion der Temperatur T_M darzustellen, damit die Temperatur bei der Montagekontrolle möglichst genau berücksichtigt wird.

3. Gerade Fahrstrecke mit Gefällsänderungen; Trassierung

Die hier vorausgesetzte vertikale Anordnung der Verbindungsseile ist vielleicht nicht die günstigste. Aber sie erlaubt die einfachste Gestaltung der Berechnung und ist infolge der aus Adhäsionsgründen beschränkten Fahrbahnneigung wohl nur «wenig vom Optimum entfernt».

31. Wahl der Vorlast, Stützenausteilung der Stützenhöhen für ein Beispiel

Die an das Längsprofil zu stellenden Anforderungen ergeben sich aus den folgenden Überlegungen: Die vertikalen Ablenkkräfte, welche von den mit der Ausbaugeschwindigkeit v (z.B. $= 120$ km/h) fahrenden Fahrzeugen ausgeübt werden, dürfen nicht zu gross sein. Es könnten sonst unangenehme Schwingungen auftreten. Deshalb soll die Vertikalbeschleunigung auf einen Wert p_V (z.B. $= 0{,}5$ m/s^2) begrenzt bleiben. Damit erhält man für die Ausrundungsradien eine untere Grenze r_{min} nach der Formel für die Fliehbeschleunigung:

$$r_{min} = \frac{v^2}{p_V} \quad \left(\text{z.B. } \frac{33{,}3^2}{0{,}5} \text{ m} = 2{,}22 \text{ km}\right) \tag{24}$$

Ein Längenprofil, dessen vertikale Krümmungsradien nirgends kleiner als r_{min} sind, soll nun mit einer (rohen, d.h. den Berechnungsmöglichkeiten angepassten) Stützenausteilung versehen werden. Zu diesem Zweck wird eine Darstellung aus Geraden- und Parabelstücken gebildet. Für die Berechnung der Lastwegkurve soll die Voraussetzung konstanter Seilspannkräfte gelten. Das Vorgehen wird anhand eines Beispieles in Bild 14 gezeigt. Oben ist das Längenprofil skizziert, von dem vorläufig erst die Bodenkontur bekannt sei. Nun versucht man, durch Zusammensetzen von geraden und gekrümmten Linien (Krümmungsradius r) eine Lastwegkurve (strichliert) zu finden. Im Tabellenteil «Lastwegkurve» sind Neigung und Höhe über Null einiger Punkte ausgehend von den angenommenen Krümmungsradien berechnet. Nun wählt man die Stützungsstandorte vorzugsweise an den Orten einer Krümmungsänderung, welche allenfalls noch infolge äusserer

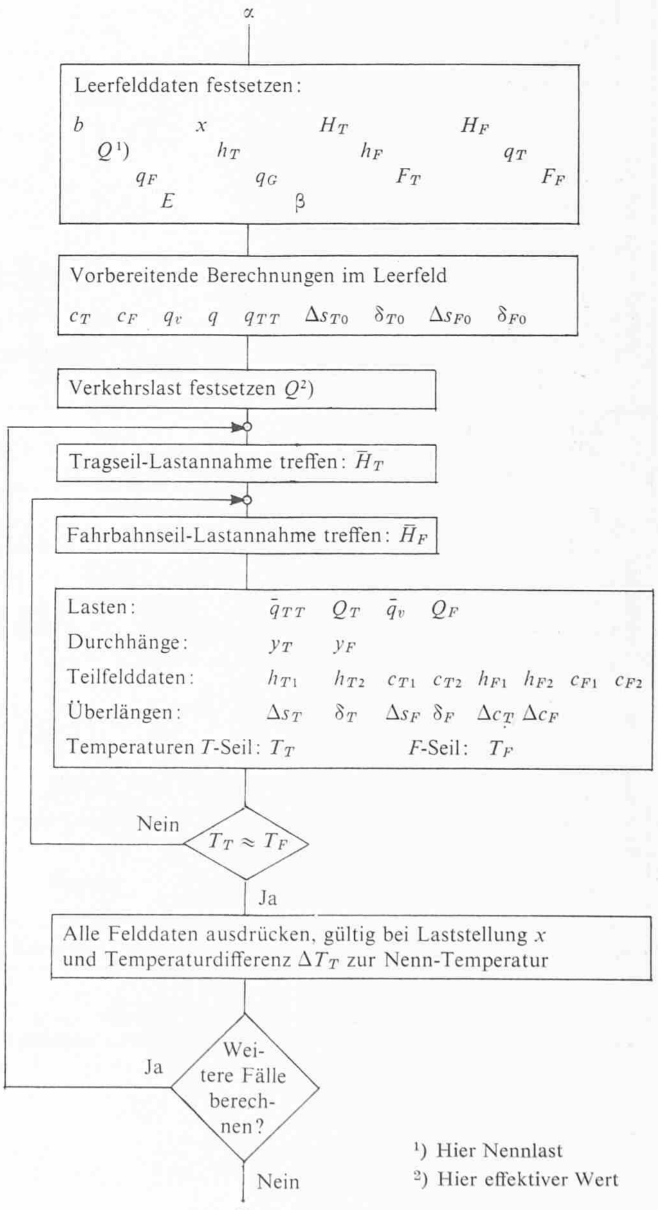
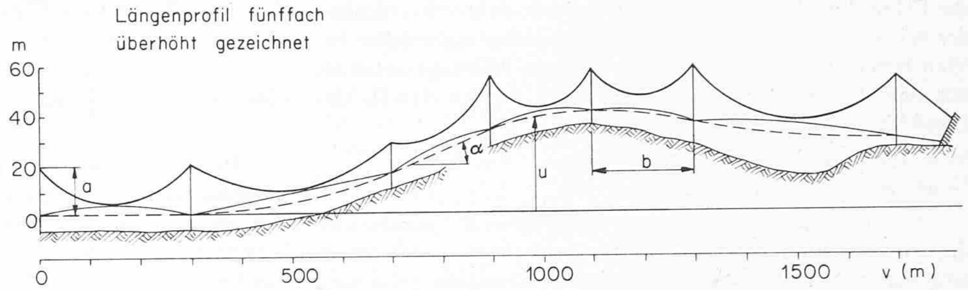


Bild 13. Flussdiagramm der Berechnung eines Lastfalles. Die Aufführung eines Symbols in den Rechtecken bedeutet, dass diesem ein Zahlenwert zugewiesen wird

Zugrundegelegte Daten:
$Q = 15$ Mp
$H_T = 100$ Mp
$H_F = 240$ Mp
Voraussetzung: $\overline{H}_T \approx H_T$, $\overline{H}_F \approx H_F$
$q = 71{,}7$ kp/m
(Seile: verschlossen,
Durchmesser 42 mm,
Anzahl 6,
Gewicht 9,5 kp/m,
weitere Belastung 14,7 kp/m)



	Bodenhöhe in m (gegeben)	−6		−6		−3		10		26		35		26		24
Lastwegkurve	Vertikaler Krümmungsradius r in m (graphisch der Bodenhöhe angepasst)		∞		+5000		+5000		∞		−2500		−5000		+10000	
Lastwegkurve	Steigung u' in % ($\Delta u' = \frac{b}{r}$)	0		0		4		8		8		0		−4		0
Lastwegkurve	Höhe u der Lastwegkurve über Bezugsniveau 0 in m $\Delta u = h_F = \frac{b^2}{2r} + bu'$	0		0		4		16		32		40		36		28

Berechnung von q_v	Stützenstandorte v in m	0		300		700		900		1100		1300		1700
Berechnung von q_v	Steigungsänderung ($tg\alpha_b - tg\alpha_0$) in %		0		$8 - 0 = +8$		0		−8		−4		+4	
Berechnung von q_v	Hilfsgrösse $\left\{\frac{1}{2}(tg\,\alpha_b - tg\,\alpha_0) - \frac{Q}{H_T+H_F}\right\}$ in %		−4,41		$\frac{1}{2}\cdot 8 - \frac{15\cdot 100}{100+240} = -0{,}41$		−4,41		−8,41		−6,41		−2,41	
Berechnung von q_v	Auf Fahrbahn wirkende Vorlast $q_v = \frac{2\cdot H_F}{c_F}\cdot\{\cdots\}$ in kp/m ($c_F \approx b$)		−70,6		$\frac{2\cdot 240000}{400}\cdot\frac{-0{,}41}{100} = -4{,}92$		−105,8		−202		−153,8		−28,9	
Berechnung der Stützenhöhen	Auf T-Seil im Leerfeld wirkende Last $q_{TT} = q - q_v$ in kp/m		142,3		$71{,}7-(-4{,}92)=76{,}62$		177,5		273,7		225,5		100,6	
Berechnung der Stützenhöhen	T-Seildurchhang $f_T \approx \frac{b^2\cdot q_{TT}}{8\cdot H_T}$ in m		16,0		$\frac{400^2\cdot 76{,}62}{8\cdot 100000} = 15{,}3$		8,87		13,66		11,28		20,1	
Berechnung der Stützenhöhen	F-Seildurchhang $f_F \approx \frac{b^2\cdot q_v}{8\cdot H_F}$ in m		−3,308		$\frac{400^2(-4{,}92)}{8\cdot 240000} = -0{,}41$		−2,21		−4,21		−3,21		−2,41	
Berechnung der Stützenhöhen	Minimalwert der Höhe über 0 des T-Sehnenmittelpunktes $\left\{\frac{1}{2}(u_0+u_b)+f_T - f_F + 0{,}5\right\}$ in m		19,808		24,21		35,58 *)		54,37		52,99 *)		55,01	
Berechnung der Stützenhöhen	Höhe über 0 des T-Seilstützpunktes in m (graphisch ausgeglichen)	19,808		19,808		28,612		52,88		55,86		58,01		52,01
Berechnung der Stützenhöhen	Höhendifferenz a des T- und F-Seilstützpunktes in m	19,808		19,808		12,612		20,88		15,86		22,01		24,01

*) in diesen Feldern liegt der Tragseilsehnenmittelpunkt höher als der Minimalwert

Damit sind die Bestimmungsdaten q_v und a der Einzelfelder festgelegt

Bild 14. Beispiel einer Trassierung im hügeligen Gelände: Oben: Längenprofil, 5fach überhöht gezeichnet. Unten: Von oben nach unten auszufüllende Berechnungstabelle für die charakteristischen Einzelfeld-Daten: Vorlast q_v und Stützhöhendifferenz a

Kriterien verschoben werden müssen (z.B. tiefes Tal von 1100 m bis 1700 m). Dann lässt sich gemäss den Anweisungen im Tabellenteil «Berechnung von q_V» die Vorlast q_V für jedes Feld berechnen. Schliesslich müssen noch die Stützenhöhen bestimmt werden, was nach den weiteren Anweisungen der Tabelle leicht möglich ist. Zur Verbesserung der Anschauung sind in der Skizze des Längenprofiles die Stützenhöhen und Leerseillagen entsprechend dem Berechnungsbeispiel eingetragen. Die Fortsetzung der Berechnung kann nun für jedes Feld einzeln erfolgen, wobei die Seillängen, die Längen der Verbindungsglieder, die Stützenauflagerkräfte und allfällig auch die Durchhänge bei der Montage nach dem früher Dargelegten zu ermitteln sind.

Anhang

In einem x,z-Koordinatensystem mit Ursprung in der Feldsehnenmitte hat die Seilparabel die Form

$$z = -f + \frac{h_T}{b}\,x + \frac{4f}{b^2}\,x^2$$

wobei f dem Durchhang y_T in Feldmitte entspricht. Setzt man nun die Seillänge in der Form

$$s = \int_{-b/2}^{+b/2} \sqrt{1 + \left(\frac{\partial z}{\partial x}\right)^2}\, dx$$

an, so erhält man zunächst

$$s = \int_{-b/2}^{+b/2} \sqrt{\frac{b^2 + h_T^2}{b^2} + 16\,\frac{h_T\,x}{b^3}\,f + \frac{64\,x^2}{b^4}\,f^2}\; dx$$

Nun wird der Integrand *vor* der Integration nach x in eine Reihe nach f entwickelt. Deren Glieder sind, abgesehen von konstanten Faktoren, Potenzen in x, so dass durch gliedweise Integration und Einsetzen von

$$f = \frac{b\,c_T\,q_{TT}}{8\,H_T}$$

die Gleichung (4a) entsteht. Infolge der guten Konvergenz der Reihe (4a) wäre eine direkte analytische Berechnung des Integrals viel aufwendiger.

Literaturverzeichnis

[1] *O. Zweifel:* Seilbahnberechnung bei beidseitig verankerten Tragseilen, «Schweizerische Bauzeitung» *78* (1960), H. 1/2, S 1—4 und 15—20.

[2] *E. Czitary:* Seilschwebebahnen. Wien 1962, Springer-Verlag.

Allgemeines über vorgespannte Seilnetze:

[3] *K. Linkwitz* und *H.-J. Schek:* Einige Bemerkungen zur Berechnung von vorgespannten Seilnetzkonstruktionen, «Ingenieur-Archiv» *40* (1971), S. 145 bis 158 (mit weiteren Literaturangaben).

Ein bedeutender Schweizer Flugzeugkonstrukteur: Hans-L. Studer 1907–1971

DK 92:629.135

Heute jährt sich erstmals der Tag, an dem der wohl bekannteste Flugzeugkonstrukteur unseres Landes im Kantonsspital St. Gallen im Alter von 64 Jahren entschlafen ist. Dr. sc. techn. *Hans-Luzi Studer,* dipl. Masch.-Ing. ETH, GEP, ein hochbegabter und bescheidener Mensch, ein Ingenieur und Flugzeugbauer von besonderen Qualitäten, starb am 21. September 1971 in seiner Heimat, die für ihn — nach vielen Enttäuschungen — keinen Arbeitsplatz mehr hatte.

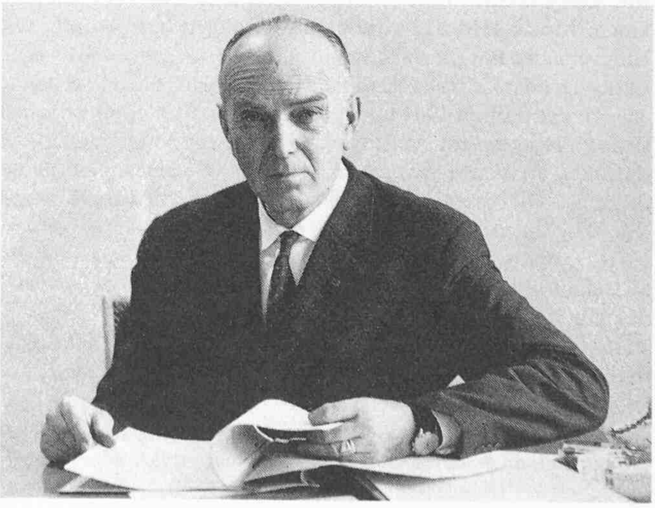
Hans-L. Studer wurde am 22. Juni 1907 in Wiesen GR als Sohn des *Hans Studer* geboren. Die Verbundenheit mit Wissenschaft und Technik lag schon in der Familie, war doch H. Studer sen. als Bauingenieur bekannt durch seine massgebende Mitarbeit am Bau der *Rhätischen Bahn,* insbesondere als Bauleiter der Strecken Filisur–Davos und Bever–Zernez. Sein bekanntestes Bauwerk ist wohl der *Wiesner Viadukt*[1]), der auch in einem Wandgemälde in den Räumen der ETH verewigt ist. Später war H. Studer sen. Bauleiter des Kraftwerkes Amsteg und danach, bis zu seinem Tode im Alter von 82 Jahren, beratender Ingenieur.

Hans-Luzi Studer verbrachte seine frühesten Jugendjahre in den Bündner Bergen. Danach kam er nach Altdorf UR, wo er die Mittelschule begann, die er in Luzern und Zürich abschloss. Anschliessend wohnte er in Küsnacht und in Erlenbach und studierte Maschineningenieurwesen an der ETH Zürich, wo er das Diplom im Jahre 1931 erwarb.

Im Jahre 1932 wurde Studer Privatassistent von Prof. Dr. *L. Karner* am Institut für Flugzeugstatik der ETH. Dort beschäftigte er sich mit der Konstruktion einer Festigkeitsprüfmaschine und mit Vorversuchen über plastisches Knicken. Ab Oktober des gleichen Jahres war Studer Assistent; er wirkte aktiv mit beim Jahresrekurs für Flugingenieure an der ETH und leitete Übungen in Flugzeugstatik; ausserdem beschäftigte er sich mit Tensometerversuchen an Flugzeug- und an Brückenteilen am gleichen Institut.

Im Oktober 1935 übernahm H.-L. Studer die Stellung eines wissenschaftlichen Mitarbeiters am neu gegründeten Institut für Aerodynamik (IfA) an der ETH Zürich unter Prof. Dr. *J. Ackeret*. In dieser Eigenschaft beschäftigte er sich mit der Erweiterung der Birnbaumschen Profiltheorie und mit der experimentellen Untersuchung der Grenzschichtabsaugung. Er wirkte auch mit bei der Entwicklung des IfA-

Dr. sc. techn. *Hans-Luzi Studer,* dipl. Masch.-Ing., 1907—1971



[1]) Siehe: Die Bahnlinie Davos–Filisur. «Schweiz. Bauzeitung» 1909, Bd. 53, H. 23, S. 291–294, H. 24, S. 305–307, und insbesondere H. 25, S. 319–324, H. 26, S. 336–340, und Bd. 54, H. 1, S. 3–7, wo H. Studer über den Wiesner Viadukt ausführlich berichtet.