

**Georg A. Kopanakis**

Beratung in Seil- und Seilbahnfragen

## **Der Einfluss der Entwicklungen im Seilbahnbau auf das Teilsystem „Seil“ heute**

### **Einleitung**

Seilbahnen (seilgezogene und/oder seilgetragene Transportmittel) sind wahrlich keine Erfindung des 21sten Jahrhunderts. Dennoch ist es nicht falsch zu behaupten, dass ihre Entwicklungsgeschwindigkeit und nicht zuletzt die Ausweitung ihres Einsatzgebietes, insbesondere in den letzten 10 Jahren, stets zugenommen haben und auch noch weiter zunehmen werden.

Für uns „Seil-„ und „Seilbahnmenschen“, die ja nachwievor behaupten, dass es „kein anderes Element bzw. Teilsystem gibt, das alle Funktionen eines Seiles adäquat übernehmen kann“, ist dies natürlich eine sehr erfreuliche Entwicklung; schließlich wird dadurch unsere Überzeugung eindrucksvoll bestätigt! Dennoch scheint es an dieser Stelle sehr wichtig, dass wir bei jeder Neu- oder Weiterentwicklung nicht versäumen, stets auch ein Auge auf die vermeintlichen „Details“ zu werfen ohne unsere Faszination an der „Sache“ zu verlieren!

Diese Anforderung, d.h. bei einzelnen Änderungen oder bei umfangreichen Entwicklungen stets und genau den Einfluss einer Änderung an allen Systemkomponenten genau zu überprüfen, ist im Bereich der Technik an sich trivial und wird auch weitgehend konsequent eingehalten. Wird hingegen diese Anforderung einmal ignoriert, wird dies vom System prompt mit einem unerwarteten Problem quittiert. Dennoch wird diese Anforderung in Bezug auf das Seil nicht immer konsequent eingehalten.

Dies ist keinesfalls das Ergebnis der Tatsache, dass Seilbahn-Ingenieure weniger zuverlässig als andere Ingenieure arbeiten! Vielmehr steckt die Ursache dieser Untugend im Seil selbst: Einer der wesentlichen Vorteile eines Seiles liegt in der Tatsache, dass es ein „gutmütiges“ Teilsystem ist. Das heisst, dass das Seil seinen kommenden Schaden frühzeitig „ankündigt“. Des Weiteren bedeutet dies aber (immer und vorausgesetzt, dass die Verantwortlichen seine Warnsignale wahrnehmen und auch verstehen können!!), dass das Seil nicht sofort und nicht immer gleich „erbost“ auf unsere gelegentlichen „miesen Taten“ reagiert. Dies führt dazu, dass häufig die Kausalität zwischen der Ursache und der entsprechenden Reaktion nicht trivial herzustellen ist. Demnach ist es evident, dass die Gefahr einen Einfluss zu übersehen, sehr groß ist, insbesondere bei Änderungen, die aus kleinen Schritten bestehen und über längere Jahre schleichend stattfinden.

Auch die Entwicklung der Seilbahnen folgt verständlicherweise den Regeln unseres Wirtschaftssystems (größer, schneller, leichter, effizienter etc.); unter diesem Aspekt wird im Folgenden versucht in drei Beispielen aufzuzeigen, was die Auswirkungen dieser Änderungen auf einzelne Elemente im Seil bedeuten können.

## Belastungen im Seilinneren

Um den Einfluss der sich global ändernden Seilkräfte auf die einzelnen Elemente des Seiles abschätzen zu können wird an einem Seil, das unter der maximal zulässigen Zugkraft ( $S_{max} = \frac{A\sigma_{Br}}{k}$ ) belastet ist, die radiale Linienlast, mit der eine Litze auf den jeweiligen Kern drückt (Schnürdruck  $q_R$ ), betrachtet. Dabei wird der Einfluss der Biege- und Torsionsmomente vernachlässigt. Darüber hinaus wird angenommen, dass zwischen den Litzen keine „Schulterberührung“ stattfindet.

Basierend auf der Berechnung der radialen Linienlast nach Feyrer [1]

$$q_R = \frac{F_{Litze} \cdot \sin^2 \alpha}{r} \quad \text{und} \quad F_{Litze} = \frac{S_{max}/n}{\cos \alpha} \quad \text{sowie nach der Substitution von } \sin \alpha, \cos \alpha \text{ und } S_{max} = \frac{A\sigma_{Br}}{k} \text{ wobei } A \text{ der metallische Querschnitt, } \sigma_{Br} \text{ die Drahtfestigkeit, und } k \text{ die gültige minimal zulässige statische Sicherheit ist, erhält man schließlich für die radiale Linienlast: } q_R = \frac{\pi^3 c_1^2 c_2}{2k c_\lambda \sqrt{(\pi c_2)^2 + c_\lambda^2}} \sigma_{Br} d_S \quad (1)$$

Darin sind  $d_S$  der Seildurchmesser,  $c_\lambda$  der Schlaglängenfaktor ( $\lambda = d_S \cdot c_\lambda$ ),  $c_1$  das Verhältnis Litzendurchmesser zu Seildurchmesser ( $d_L = d_S c_1$ ) und  $c_2 = 1 - c_1$ .

Die dadurch entstehende maximale Hertzsche Pressung zwischen der Litze und der Einlage wird wie folgt berechnet (Idealfall: Berührung zweier Zylinder mit den Radien  $r_1$  und  $r_2$ , E-Moduli  $E_1$  und  $E_2$ , Querkontraktionszahlen  $\nu_1$  und  $\nu_2$  und  $d_{Einlage} = d_S c_3$ ):

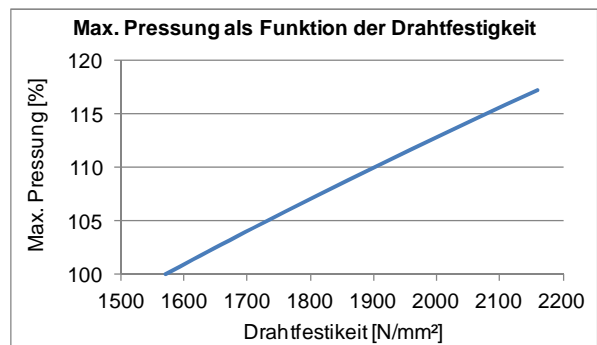
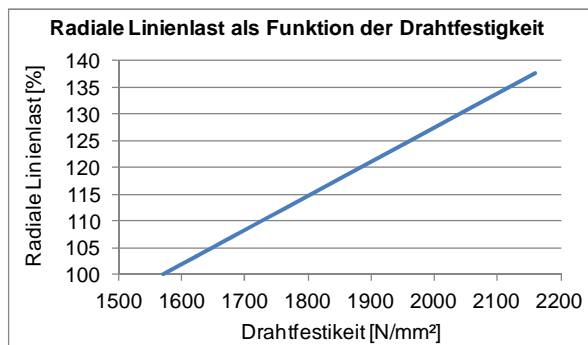
$$p_{Max} = \sqrt{\frac{E}{2\pi r(1-\nu^2)} \frac{F}{l}} \Rightarrow p_{Max} = \sqrt{\frac{(c_1+c_3)E_1E_2}{\pi d_S c_1 c_3 (E_2(1-\nu_1^2) + (E_1(1-\nu_2^2)))}} q_R \quad (2)$$

$$(1) \text{ in } (2) \Rightarrow p_{Max} = \sqrt{\frac{(c_1+c_3)E_1E_2}{\pi c_1 c_3 (E_2(1-\nu_1^2) + E_1(1-\nu_2^2))}} \cdot \frac{\pi^3 c_1^2 c_2}{2k c_\lambda \sqrt{(\pi c_2)^2 + c_\lambda^2}} \sigma_{Br} \quad (3)$$

Daraus sind folgende Erkenntnisse ersichtlich:

### Einfluss der Drahtfestigkeit „ $\sigma_{Br}$ “

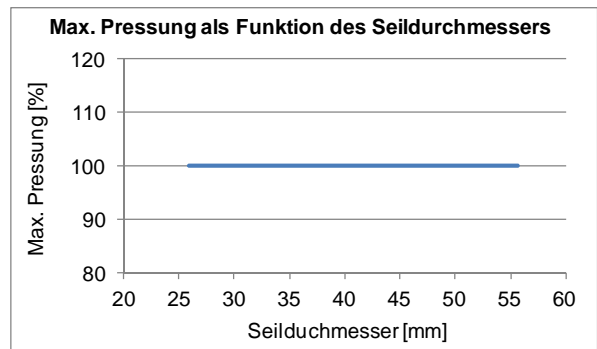
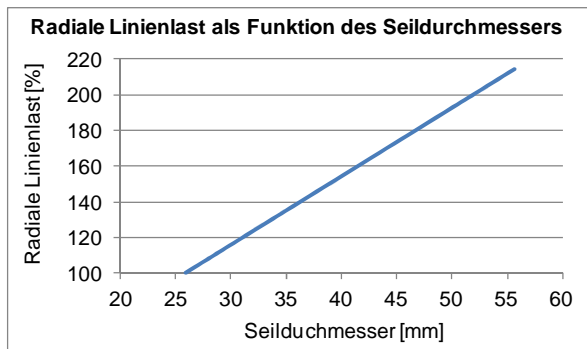
- (1)  $\Rightarrow$  Die radiale Linienlast hängt proportional von der Drahtfestigkeit ab.
- (3)  $\Rightarrow$  Die maximale Hertzsche Pressung zwischen einer Litze und der Einlage hängt proportional von der Quadratwurzel der Drahtfestigkeit ab.



### Einfluss des Seildurchmessers „ $d_S$ “

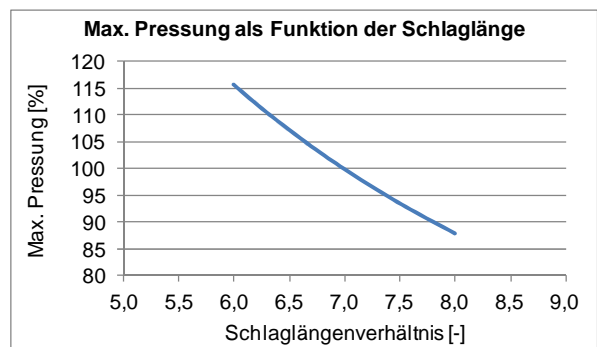
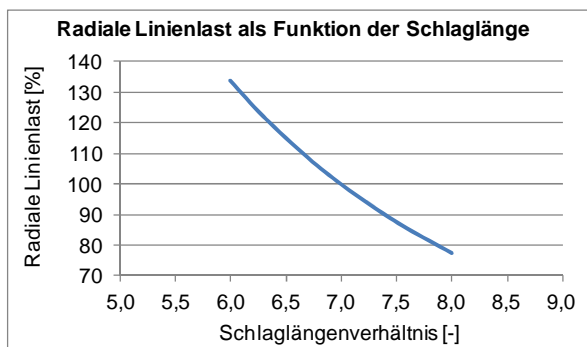
- (1)  $\Rightarrow$  Die radiale Linienlast hängt proportional vom Seildurchmesser ab.
- (3)  $\Rightarrow$  Die maximale Hertzsche Pressung zwischen einer Litze und der Einlage ist unabhängig vom Seildurchmesser.

[1] Klaus Feyrer: „Drahtseile“, Bemessung-Betrieb-Sicherheit, Springer Verlag 1994



### *Einfluss des Schlaglängenfaktors „ $c_\lambda$ “*

- (1)  $\Rightarrow$  Die radiale Linienlast hängt umgekehrt proportional zum Quadrat des Schlaglängenfaktors ab.
- (3)  $\Rightarrow$  Die maximale Hertzsche Pressung zwischen einer Litze und der Einlage hängt umgekehrt proportional vom Schlaglängenfaktor ab.



### *Auswirkungen*

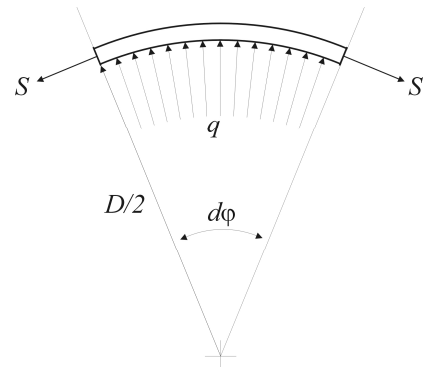
- Die primär infolge der höher werdenden Drahtfestigkeit höher werdende Pressung auf die Seileinlage hat, insofern ihr nicht mit geeigneten Maßnahmen begegnet wird, zur Folge, dass die Einlage ihre Funktion über die Zeit nicht adäquat erfüllen kann. Deswegen kann es früher zur Litzenberührung und somit zu Drahtbrüchen kommen. Aus dem gleichen Grund wird auch das Einhalten der erwünschten „Längungsarmut“ (möglichst kleine bleibende „Dehnung“) entsprechend schwieriger.
- Die Variation der radialen Linienlast und der Pressung als Folge der Variation der Schlaglänge ist hauptsächlich im Zusammenhang mit der zur Reduktion der Litzen-induzierten Vibrationen notwendige Anpassung des Verhältnisses „Rollenabstand/Litzenabstand“, zu sehen. Es ist wichtig zu unterstreichen, dass unter Berücksichtigung der Funktion des Spleißes, das Schlaglängenverhältnis nicht „zu groß“ werden darf, da die für die Funktion des Spleißes notwendige radiale Linienlast gegebenenfalls zu klein werden kann, wodurch die Funktion des Spleißes beeinträchtigt wäre.

## **Belastungen an den Endbefestigungen (Trommelverankerung)**

Die Trommelverankerung (Poller) wird im Bereich der Seilbahnen in der Regel als Endbefestigung von Tragseilen eingesetzt. Die Entwicklung der radialen Linienlast des Seiles auf den Poller über die Jahre wollen wir mittels folgender Betrachtung berechnen:

Der Maximalwert der radialen Linienlast  $q$ , die ein um einen Poller mit dem Durchmesser  $D$  umwickeltes Seil auf die Pollereinlage ausübt, berechnet sich wie folgt:

$q \frac{D}{2} d\varphi = 2S \left( \frac{d\varphi}{2} \right) \Rightarrow q = 2 \frac{S}{D}$  (4), wobei  $S$  die Zugkraft des Seiles ist.



Unter Berücksichtigung der Tatsache, dass in der Norm das Durchmesser Verhältnis  $\frac{D_{Poller}}{d_S} = c_{Poller}$  festgeschrieben ist, kann die Gleichung (3) wie folgt umgeschrieben werden:

$$q_{Max} = 2 \frac{S_{Max}}{D_{Poller}} = 2 \frac{A \sigma_{Br}}{k D_{Poller}} \Rightarrow q_{Max} = \frac{\pi d_S^2 \sigma_{Br}}{2 k D_{Poller}} \Rightarrow q_{Max} = \frac{\pi d_S \sigma_{Br}}{2 k c_{Poller}} \quad (5)$$

Die dadurch entstehende maximale Hertzische Pressung zwischen dem Seil (weitgehend zylindrisch) und der Pollereinlage wird wie folgt berechnet (Idealfall: Berührung eines Zylinders mit einer Ebene;  $r = r_S = \frac{d_S}{2}$ ):

$$p_{Max} = \sqrt{\frac{E}{\pi d_S (1-\nu^2)}} q_{Max} \Rightarrow p_{Max} = \sqrt{\frac{E_1 E_2}{(E_2 (1-\nu_1^2) + E_1 (1-\nu_2^2))}} \cdot \frac{\sigma_{Br}}{k c_{Poller}} \quad (6)$$

#### *Einfluss der Drahtfestigkeit „ $\sigma_{Br}$ “*

- (5)  $\Rightarrow$  Die maximale radiale Linienlast hängt proportional von der Drahtfestigkeit ab.
- (6)  $\Rightarrow$  Die maximale Hertzische Pressung hängt proportional von der Quadratwurzel der Drahtfestigkeit ab.

#### *Einfluss des Seildurchmessers „ $d_S$ “*

- (5)  $\Rightarrow$  Die maximale radiale Linienlast hängt proportional vom Seildurchmesser ab.
- (6)  $\Rightarrow$  Die maximale Hertzische Pressung ist unabhängig vom Seildurchmesser.

#### *Einfluss des Durchmesser Verhältnisses „ $c_{Poller}$ “*

- (5)  $\Rightarrow$  Die maximale radiale Linienlast hängt umgekehrt proportional vom Durchmesser Verhältnis ab.
- (6)  $\Rightarrow$  Die maximale Hertzische Pressung hängt umgekehrt proportional von der Quadratwurzel des Durchmesser Verhältnisses ab.

#### *Auswirkungen*

Die Auswirkungen dieser im Laufe der Jahre schleichend stattfindenden Änderung bzw. Kombination von Änderungen wird in der folgenden Tabelle illustriert.

			Bahn 1 (1970)	Bahn 2 (1974)	Bahn 3 (1985)	Bahn 4 (1995)	Bahn 5 (2008)	Bahn 6 (2010)
Pollerdurchmesser	D	[mm]	3600	3600	3600	3650	5000	6000
Seildurchmesser	d	[mm]	47,2	48	50	53,8	70	90
<b>Durchmesser Verhältnis</b>	<b>D / d</b>	<b>[-]</b>	<b>76,27</b>	<b>75,00</b>	<b>72,00</b>	<b>67,84</b>	<b>71,43</b>	<b>66,67</b>
Vergleich		[%]	100,00	98,33	94,40	88,95	93,65	87,41
Bruchlast	MBK	[kN]	2354	2384	2619	3131	5513	9000
Seilzug	S	[kN]	640	735	780	920	1745	2860
<b>Statische Sicherheit</b>	<b>SF</b>	<b>[-]</b>	<b>3,68</b>	<b>3,24</b>	<b>3,36</b>	<b>3,40</b>	<b>3,16</b>	<b>3,15</b>
Vergleich		[%]	100,00	88,18	91,29	92,53	85,89	85,56
<b>Maximale Linienlast</b>	<b>q<sub>max</sub></b>	<b>[N/mm]</b>	<b>351</b>	<b>403</b>	<b>427</b>	<b>497</b>	<b>688</b>	<b>939</b>
Vergleich		[%]	100,00	114,82	121,78	141,55	196,14	267,63

In der Praxis bedeutet dies, dass die vorherrschenden Lasten häufig die Druckfestigkeit der Einlage überschreiten und/oder die durch die nicht vorgesehene Durchmesserabnahme des Pollers verursachte Seilbewegung unter den hohen Drücken zur Schädigung des Seiles selbst führen kann.

In diesem Kontext sind folgende Schritte notwendig, um die oben erwähnten Probleme zu vermeiden:

- die Wahl einer Pollereinlage mit genügend hoher Druckfestigkeit sowie
- die Rillierung der Einlage, mindestens im Bereich an dem das Seil auf den Poller aufläuft, um hiermit den lokalen Druck zu reduzieren.

## Arbeitszyklen (Anzahl Seilumläufe)

Ein Seil im Einsatz ist ein zeitfestes Teilsystem, da es stets einem Ermüdungsprozess ausgesetzt ist. Andererseits gehören zur Ermüdung bekanntlich ein Anriss bzw. eine Diskontinuität, eine schwellende Belastung und schließlich bei einer gegebenen Belastungsart eine bestimmte Anzahl Zyklen bis zum Bruch.

Unter Berücksichtigung der Tatsache, dass die Biegebeanspruchung eines um eine Scheibe laufenden Seiles die dominante Beanspruchungsart darstellt und deswegen die Anzahl solcher Biegungen für die Seillebensdauer bestimmend sind, ist es wichtig die Entwicklung der Biegewechselzahlen über die Jahre zu analysieren.

Die Faktoren, die die Anzahl der Biegewechsel ( $N$ ) im Falle eines umlaufenden Seiles bestimmen, sind die Betriebsgeschwindigkeit ( $v$ ), die Bahnlänge ( $l$ ), die Anzahl der Betriebsstunden pro Tag ( $H_B$ ) und die Anzahl Betriebstage pro Jahr ( $T_B$ ):  $N = \frac{T_B H_B 3600}{2l/v}$ .

Diese einzelnen Einflussgrößen wurden im Laufe der letzten 50 Jahre wie folgt verändert:

- Die Fahrgeschwindigkeit der häufigsten Seilbahnart (Umlaufbahn) ist von 3 m/s auf 6 m/s angestiegen.
- Es gibt vermehrt einzelne Bahnen (Zubringer) die eine kurze Länge aufweisen; ansonsten variiert die Länge der Mehrheit der Bahnen in ähnlichen Bereichen.
- Die Anzahl Betriebsstunden pro Tag ist tendenziell gestiegen. Insbesondere bei Bahnen, die bei beleuchteten Pisten einen Nachtbetrieb anbieten. Ansonsten sind Bahnen, die als urbane Verkehrsmittel oder als Verbindungen an Flughäfen etc. eingesetzt werden, praktisch durchgehend im Betrieb.
- Zunehmend wechseln die Bahnen vom reinen Winterbetrieb zum ganzjährigen Betrieb und die urbanen Bahnen sind bis auf die Wartungs- und Instandhaltungsperioden ohnehin durchgehend im Betrieb.

### Auswirkungen

Die Auswirkungen der erfolgten Änderungen auf die jährliche Anzahl der vom Seil ertragenen Biegewechsel werden in der folgenden Tabelle gezeigt.

Die Daten stammen aus einer Reihe von kuppelbaren Kabinenbahnen, die über eine Antriebs- und eine Umlenkscheibe verfügen.

Ein Biegewechsel (BW) entspricht dem Auf- und Ablauen eines Seilquerschnitts über eine Scheibe.

Jahr	Länge [m]	Geschw. [m/s]	Betriebsstunden pro Tag [h/T]	Betriebstage pro Jahr [T/J]	Biegewechsel pro Jahr [BW/J]	Vielfaches des niedrigsten[-]
1953	2390	2,5	7	120	3163	x 1,00
1961	2447	3,5	7	120	4325	x 1,37
1972	2280	4	8	135	6821	x 2,16
1980	2550	4,5	8	130	6607	x 2,09
1987	2035	5	8	210	14860	x 4,70
1999	932	5,5	8	270	45888	x 14,51
2008	2708	6	12	270	25843	x 8,17
2010	805	6	18	365	176288	x 55,73

Auch hier ist offensichtlich, dass die Anzahl Seilumläufe pro Jahr im Laufe der Jahre ständig gewachsen ist. Darüber hinaus kann man davon ausgehen, dass sie weiter wachsen wird. Ein besonderes Augenmerk gilt hier den immer häufiger anzutreffenden „kurzen“ Bahnen. Da sie ansonsten „gleich“ wie die „üblichen“ Bahnen sind, wird oft vergessen, dass die Anzahl Biegewechsel umgekehrt proportional zur Bahnlänge wächst.

Es ist schließlich evident, dass bei gleich bleibender Seilqualität die Seillebensdauer -rein zeitlich betrachtet- ständig kürzer wird. Aus diesem Grund muss mit Nachdruck betont werden, dass insofern weder die Norm noch der Seil- oder Seilbahnhersteller gesondert darauf hinweisen, es in der Verantwortung des jeweiligen Betreibers liegt, die Planung der Wartung und Instandhaltung so zu gestalten, dass die höhere Anzahl Arbeitszyklen pro Zeit adäquat berücksichtigt werden.

## Schlusswort

Alle oben aufgezeigten Änderungen, die im Laufe der Zeit stattgefunden haben sowie ihre aufgezeigten Konsequenzen dürfen nicht als verdeckte Empfehlung zum zukünftigen „Stillstand“ aufgefasst werden!

Vielmehr scheint es wichtig zu unterstreichen, dass insofern bei einer Neuentwicklung alle Einflussfaktoren bzw. Parameter bereits im Entwicklungsstadium erkannt, untersucht und entsprechend gewählt werden, keine unangenehme Überraschung befürchtet werden muss. Wenn man jedoch fälschlich, indem man nur auf „alten“ Erfahrungen basiert und ohne die Zusammenhänge genauer zu kennen, eine Änderung vornimmt, dann besteht die reelle Gefahr, dass kurz- oder langfristig eine Störung oder auch ein Schaden entstehen kann.