

Schwingungen bei Seilbahnen (8. Teil)

Seilfeldschwingungen: Ursachenbekämpfung bzw. Reduktion der Schwingungsintensität

Im achten und zugleich letzten Beitrag der Artikelserie „Schwingungen bei Seilbahnen“ wird die Vermeidung bzw. Verringerung von „Pumpschwingungen“ sowie von Seilfeldschwingungen infolge Einwirkung von außen abgehandelt.

Änderung der Lastverteilung auf der Strecke (Pumpschwingungen)

Die rhythmischen und normalerweise lang anhaltenden Transversalbewegungen, wie sie bei Pumpschwingungen auftreten, können zu erheblichen Komforteinbußen und in Extremfällen zu Betriebszuständen führen, die bezüglich Sicherheit unzulässig sind. Aus diesem Grund besteht das Bestreben, solche Situationen zu vermeiden oder zumindest zu entschärfen. Dies kann durch verschiedene Maßnahmen erreicht werden, die vorzugsweise vom Hersteller selber oder vom Betreiber der Anlage vorgenommen werden können.

Die effektivste und in diesem Fall auch kostengünstigste Vorkehrung im Sinne der Ursachenbekämpfung kann bzw. sollte bereits während der Planungsphase der Anlage getroffen werden. Dies betrifft in erster Linie die geeignete Positionierung der Stützen, um eine aperiodische Lastumlagerung aus der Stützenüberfahrt der Fahrzeuge in jedem Seilfeld zu erzielen. Dadurch wird vermieden, dass das jeweilige Seilfeld in der Eigenfrequenz des Systems zum Schwingen angeregt wird. Hierbei spielt natürlich die Fahrgeschwindigkeit, der Fahrzeugabstand sowie die Seilspannkraft und die Gesamtmasse eine wichtige Rolle.

Sobald die Anlage bereits gebaut und in Betrieb ist, sind diese Eckdaten insofern „eingefroren“, als davon die Einhaltung der Vorschriften und das Erreichen der Förderleistung direkt abhängen. Vorausgesetzt, dass der Betreiber bereit ist, eine Reduktion der Förderleistung in Kauf zu nehmen, kann in diesem Fall mittels Veränderung des Fahrzeugabstandes und/oder Anpassung der Fahrge-

windigkeit eine signifikante Reduktion der Pumpschwingung erreicht werden. In Bild 1 (Diagramme 1a und 1b) wird die Auswirkung der reduzierten Fahrgeschwindigkeit auf das Schwingungsverhalten der Anlage verdeutlicht. (Anm. d. Red.: Die Diagramme stammen von Dipl.-Ing. (ETH) Dr. Gabor Kovacs, der im Abschnitt Pumpschwingungen dieses Beitrags als Koautor mitgewirkt hat).

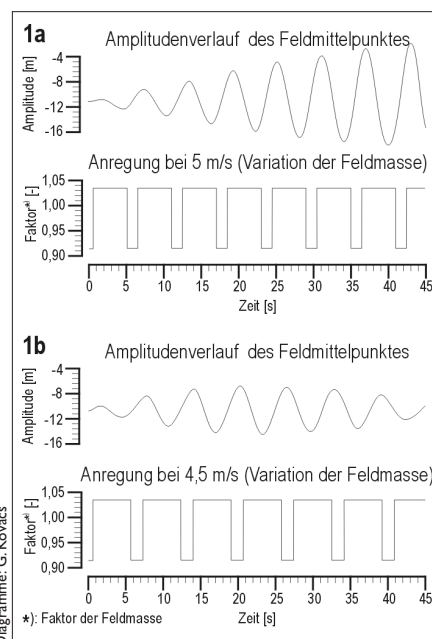


Bild 1: Schwingungsanregung des Feldes durch periodische Massenveränderung bei einer Geschwindigkeit von $v = 5 \text{ m/s}$ (siehe Bild 1a) und bei $v = 4.5 \text{ m/s}$ (siehe Bild 1b)

In beiden Diagrammen ist die Veränderung der Masse in einem Seilfeld als Funktion der Zeit durch eine Rechteckfunktion idealisiert dargestellt. Die Periodizität (Breite der Rechtecke) ist direkt von der Bahngeschwindigkeit und dem Fahrzeugabstand abhängig. Hierbei zeigt sich deutlich, dass sich die Breite und Abstände der Rechtecke wesentlich auf die Anregung des Feldes auswirken. Bei kleinerer Geschwindigkeit (Bild 1b) wird die Periode der Anregung größer und somit wird das Feld nicht mehr in der Eigenfrequenz (wie im Bild 1a) angeregt; die Schwingungs-

amplitude wird hierdurch reduziert oder gegebenenfalls getilgt. Ein ähnlicher Effekt kann mit der Vergrößerung des Fahrzeugabstandes erreicht werden. In diesem Fall kann der jeweils zusätzlich notwendige Abstand in seiner Größe zufällig variiert werden, damit der Verlust der Förderleistung so gering wie möglich gehalten werden kann. Eine Vergrößerung der Fahrgeschwindigkeit oder eine Verringerung der Fahrzeugabstände kommt in den meisten Fällen – wegen der geltenden Vorschriften oder des Überschreitens von Grenzwerten aus der Bemessung von Bauteilen – nicht in Frage. Selbstverständlich kann auch eine Kombination der genannten Maßnahmen sinnvoll sein, wenn dadurch der Verlust an Förderleistung minimiert werden kann. Schließlich besteht für den Betreiber nebst der Verwendung eines rechnerischen Verfahrens grundsätzlich die Möglichkeit, durch gezielte Variation der erwähnten Einflussparameter die bestmögliche Kombination, bei der sich eine zufriedenstellende Reduktion der Pumpschwingung einstellt, auch experimentell zu ermitteln.

In vielen Fällen wirkt sich die Pumpschwingung auch auf die Seilgeschwindigkeit (oder Kraftänderung) in den Stationen aus. Sowohl die Gestaltung des Antriebs als auch der Umlenkung haben einen maßgeblichen Einfluss auf das Schwingungsverhalten der gesamten Anlage, da sich die transversale Schwingungsbewegung der betroffenen Felder auf die Längsbewegung des gesamten Seiles auswirkt. Dieser Effekt kann dann direkt an der periodisch wechselnden Stromaufnahme am Antrieb beobachtet werden. Genau dieser Umstand bietet nun die Möglichkeit, die Pumpschwingung von der Station aus über die Fahrgeschwindigkeitsregelung aktiv zu beeinflussen. In diesem Fall wird jedoch dringend empfohlen, die Anpassung des Regelkreises nur in Zusammenarbeit mit dem Steuerungslieferanten und dem Seilbahnhersteller durchzuführen.

In der Umlenkstation kann diese Längsbewegung durch die variierende Rotationsgeschwindigkeit der Umlenkscheibe (zum Teil



auch akustisch) wahrgenommen werden. Die Bekämpfung dieser oszillierenden Bewegung kann nur durch eine zusätzliche Einrichtung, welche die oszillierende Drehzahlabweichung der Scheibe minimiert, erfolgen. Eine Möglichkeit dazu besteht in der Anpassung der Trägheitsmasse der Scheibe, um die kritische Eigenfrequenz des Gesamtsystems und somit auch der schwingenden Felder zu verändern. Bei einer allfälligen Nachrüstung kann z. B. eine schnell rotierende Ausgleichsmasse (mittels Übersetzungsgetriebe für die Drehzahlübersetzung) an die Scheibe angekoppelt werden. Dadurch wird bei bereits geringen Geschwindigkeitsänderungen eine große Beschleunigung der rotierenden Masse erzwungen und folglich ein zusätzliches Massenträgheitsmoment erzeugt, welches die Trägheit des Gesamtsystems effektiv verändert. Dabei muss jedoch darauf geachtet werden, dass sich bei einer Sicherheitsbremsung mit hoher Verzögerung keine gefährliche Situation einstellt (Stichwort: Rutschkupplung). Im Extremfall wäre auch die Installation eines ähnlichen Systems auf den Stützen, die an die betroffenen Seilfelder angrenzen, denkbar. Zusammenfassend kann festgestellt werden,

dass die Möglichkeiten zur nachträglichen Bekämpfung von Pumpschwingungen aus den oben erwähnten Gründen stark limitiert sind. Als ideale Lösung bleibt natürlich die in der Planungsphase auf dieses potentielle Problem hin korrekte Auslegung der Anlage. Wenn dies nicht der Fall sein sollte und nachträglich mit zusätzlichen technischen Eingriffen abgeholfen werden muss, wird dies meist mit einem Verlust an Förderleistung erkauft. Wenn jedoch durch eine solche Lösung keine sicherheitsrelevanten Probleme entstehen und der Verlust an Förderleistung tragbar ist, so stellt diese Variante sicherlich die kostengünstigste Maßnahme dar.

Einwirkung von außen

Herabstürzende Gegenstände: Im Falle einer solchen einmaligen Anregung ist es offensichtlich, dass man versuchen wird die „Anregung“ zu vermeiden, mit anderen Worten, man wird versuchen die Bahntrasse so aufzubereiten, dass insbesondere auch im Falle eines umstürzenden Baumes die Bahn bzw. das Seil nicht getroffen werden können. Versuche, die 1990 in den USA durchgeführt

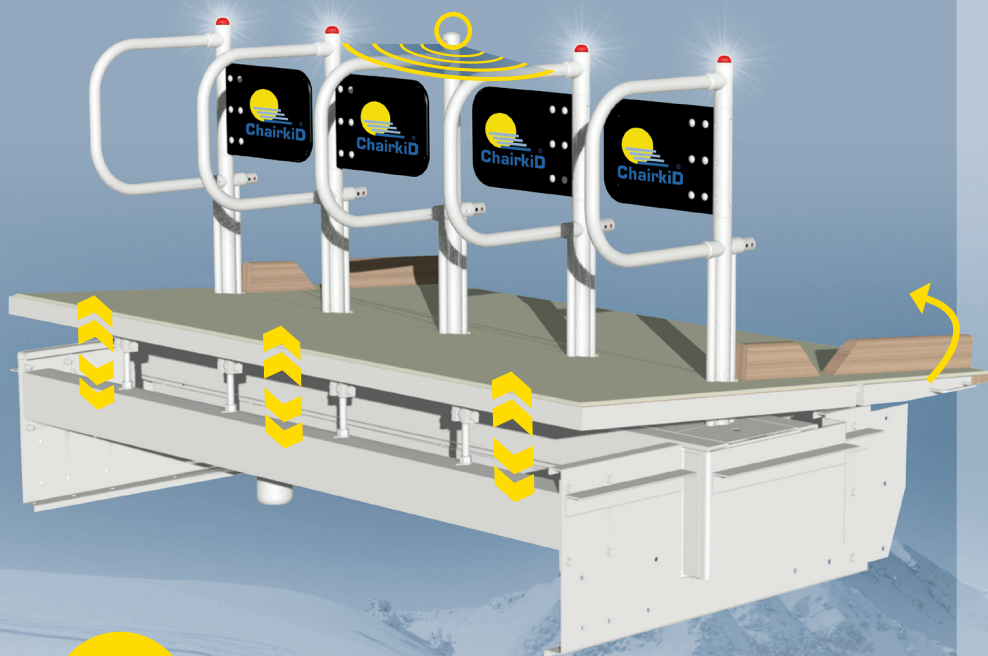
TECHNIK

wurden, haben gezeigt, dass „schwach“ gespannte Seile, die mit einer relativ kleinen Kraft auf der Stütze liegen, von umstürzenden großen Bäumen in starke Schwingungen versetzt werden, die zur Entgleisung führen können. Bäume dagegen, die stark gespannte Seile nur mit ihrer Spitze erfassen, verursachen an der Anlage keinen nennenswerten Schaden (ausgenommen eventuell entstandene Verletzungen der Seiloberfläche, die nachträglich instandgesetzt werden können), da sie entlang des Seiles herabgleiten. (Siehe Zeitschrift des Vereins des Technischen Personals VTP Nr. 89 / Aug. 1992, S. 18 – 23, „Verhalten einer Sesselbahn in Extremsituationen“, praxisbezogene Versuche am Eskimolift in Winterpark, CO (USA), 18./19. Juni 1990, Kommentar: G. A. Kopanakis). Ansonsten sollte man im Allgemeinen danach streben, dass zumindest während des Bahnbetriebs keine Gegenstände über der Bahntrasse schweben.

Windeinflüsse – allgemein: Die infolge des Luftwiderstands anzunehmende horizontale Windkraft auf das Seil ist in den Normen und den Vorschriften vorgegeben und wird

NEW! ChairkiD >>> easy access <<<

the loading experts



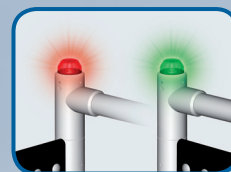
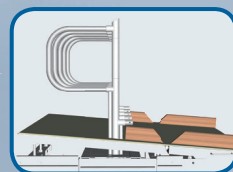
Neu! ChairkiD >>> easy access <<<

Schranke:

- >>> Elektrischer Sicherheitsantrieb (m. Zahnriemen)
- >>> Schrankeneinheit verzinkt / Edelstahl
- >>> LED »stop & go« Regelung (optional)
- >>> Personenerkennung und -zählung (optional)
- >>> Servicefreundlich und wartungsarm

Rampe:

- >>> Holzauflage mit Schneevlies
- >>> Seitliche Führungsleisten
- >>> Neigung einstellbar (0% - 10%)
- >>> Klappbar für Service



New! ChairkiD >>> easy access <<<

loading gates:

- >>> low impact, high efficiency gate motors
- >>> galvanized / inox structure
- >>> »stop & go« LED lights (optional)
- >>> user detection eyes with counter (optional)
- >>> low maintenance & service reduced

loading ramp:

- >>> wood surface with snow fleece covering
- >>> side ski tip guides
- >>> adjustable ramp inclination (0% - 10%)
- >>> hinged ramp for quick & easy servicing


ChairkiD

ChairkiD Fördertechnik GmbH
A-6300 Wörgl
Brixentaler Straße 59
Tel. +43-5332-76483
Fax +43-5332-73246
office@chairkid.com

ChairkiD North America, Inc.
1949C Willamette Falls Dr.
West Linn, OR 97068
phone: (503)-780-9036
fax: (360)-838-1749
office.usa@chairkid.com

www.chairkid.com



TECHNIK

bei der Berechnung der Bahn berücksichtigt. Der Betreiber kann auf die Windkräfte nur Einfluss nehmen, indem er den wirksamen Seilquerschnitt infolge Vereisung nicht wesentlich größer werden lässt: Mittels häufigen Fahrens außerhalb des regulären Betriebs kann die Ausbildung von größerem Eisbehang und somit die Vergrößerung des Seildurchmessers verhindert werden (Siehe auch ISR 2/11, S. 59, „Lastabwurf“).

Windeinfluss – Kármánsche Wirbel: Damit beim Umströmen eines Körpers Kármánsche Wirbel entstehen können, ist es notwendig, dass der Querschnitt des umströmten Körpers kreisrund ist. Kármánsche Wirbel können also zylindrische Körper zu Schwingungen quer zur Anströmrichtung anregen. Die Frequenz der so entstehenden Transversalschwingung kann mit folgender Formel berechnet werden:

$$f = S_r \cdot \frac{v}{d}$$

- f** : Frequenz [Hz]
- S_r** : „Strouhal-Zahl“ (ca. 0,2 für einen Zylinder)
- v** : Geschwindigkeit [m/s]
- d** : Durchmesser [m]

Wenn man nun die einlagigen Litzenseile betrachtet, wie sie mehrheitlich im Seilbahnbereich anzutreffen sind, stellt man fest, dass sie mit Sicherheit keinen kreisrunden Querschnitt haben (Siehe ISR 1/2008, S. 22, „Wie rund sind Litzenseile?“, Prof. Dr. J. Nejez). Aus diesem Grund ist man geneigt daraus zu schließen, dass Kármánsche Wirbel im Bereich von Seilbahnen kein Problem darstellen; dies ist jedoch insofern falsch, als vollverschlossene Spiralseile, insbesondere neue ohne Schmiermittel- und Schmutzablagerungen, einen praktisch idealrunden Querschnitt aufweisen und aus diesem Grund sehr wohl anfällig auf Transversalschwingungen infolge der Kármánschen Wirbel sind: Wenn ein länger anhaltender Wind aus einer konstanter Richtung bläst und eine konstante Geschwindigkeit hat, infolge dessen die Frequenz der Kármánschen Schwingung im Bereich der Frequenz der möglichen Oberschwingungen des Feldes liegt, dann wird am Tragseil eine Schwingung (stehende Welle) entstehen, die meistens durch einen tiefen Summton („Brummen der Tragseile“) wahrnehmbar ist.

Im Sinne einer Ursachenbekämpfung kann die Entstehung der Kármánschen Wirbel allgemein dadurch unterbunden werden, dass man die „Rundheit“ des Querschnitts

mittels z. B. eines schraubenförmigen auf der Zylinderoberfläche angebrachten Elements „stört“. Ein bekanntes Beispiel aus dem Alltag dafür ist die schraubenförmige Oberfläche von feststehenden Autoradio-Stubantennen (Bild 2).



Bild 2: Autoradio-Stubantenne

Bei einem Tragseil ist jedoch diese Methode nicht anwendbar, da die „Rundheit“ eines Tragseils eines seiner angestrebten Vorteile ist; darüber hinaus wird ein Tragseil stets von den Laufwerksrollen überfahren.

In diesem Fall kann man sich dadurch behelfen, dass man versucht die Schwingung zu dämpfen, ähnlich wie für den Fall der Zugseilschwingung, die bei der Stützenüberfahrt bei Zweiseilpendelbahnen entsteht (Siehe ISR 2/11, S. 58, Bild 2).

Eine weitere Möglichkeit zur Dämpfung bietet auch die Lösung, die bei vergleichbaren Schwingungen von Freileitungen eingesetzt wird. Hier wird die Schwingung mittels eines „Stockbridge-Dämpfers“ gedämpft. Der Stockbridge-Dämpfer (Bild 3a) besteht aus einem kurzen Seilstück (S) mit beschwerten Enden (E1 und E2), das in der Nähe des Feldendes (Stütze oder Station) unten und parallel an das Seil geklemmt wird (Bild 3b). Die Seilschwingung versetzt den gesamten Dämpfer in Bewegung; die dadurch in Bewegung geratenen beschwerten Seilstückenden zwingen das kurze Seilstück, an dem sie verbunden sind, eine Wechselbiegung durchzuführen. Dadurch wird die zur Überwindung der inneren Seilreibung notwendige Energie dem schwingenden System entzogen und der

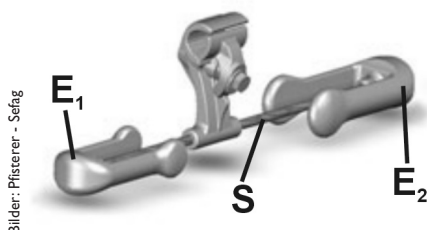


Bild 3a: Stockbridge-Dämpfer, so wie er an Freileitungen eingesetzt wird

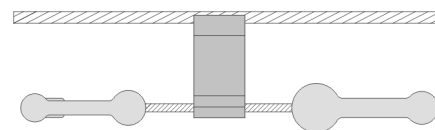


Bild 3b: Dämpfer, parallel an das Seil geklemmt

Umgebung als Reibungswärme abgegeben. Bei beiden Lösungen ist es notwendig darauf zu achten, dass die anzubringenden Dämpfer das Freiraumprofil der Bahn nicht verletzen. Aus diesem Grund sollte das Planen und Anbringen von derartigen Dämpfern stets dem Seilbahnhersteller überlassen werden.

Schließlich kann auch die Querverpendelung einer kreisrunden Einseilumlaufbahn-Kabine, die als Folge der Kármánschen Wirbel entsteht, im Sinne einer Ursachenbekämpfung dadurch unterbunden werden, dass man die „Rundheit“ des Querschnitts der Kabine mit irgendwelchen vertikal verlaufenden Leisten „stört“.

Windeinfluss – Galopping: Zur Entstehung von Galopping ist ein längliches Querschnittsprofil notwendig und dies ist im Falle von Seilen nur bei Eisbehang der Fall. Aus diesem Grund führt eine konsequente Ursachenbekämpfung entweder während der Planungsphase – nur insofern dies möglich ist – über eine Standortwahl, bei der die Wahrscheinlichkeit der Vereisung klein ist, oder während des Betriebs über das häufige Fahren außerhalb des regulären Betriebs, damit die Ausbildung von größerem Eisbehang vermieden wird (siehe auch „Windeinflüsse – allgemein“).

Zum Abschluss der Artikelserie „Schwingungen bei Seilbahnen“ möchten sich alle Autoren bei Herrn Prof. Dr. Dr. h. c. Gabor Oplatka bedanken, der in den 80er und 90er Jahren als Leiter des Bereichs Seilbahntechnik am Institut für Leichtbau und Seilbahntechnik der ETH Zürich den von seinem Vorgänger Prof. Dr. Otto Zweifel initiierten Forschungsschwerpunkt betreffend die Schwingungen bei Seilbahnen konsequent weitergeführt, selbst signifikant geprägt und seinen Assistenten die Faszination dieses Themas vermittelt hat.

Auch und nicht zuletzt ein großer und herzlicher Dank gebührt Herrn Prof. Dr. Josef Nejez für die überaus kritische Durchsicht jedes einzelnen Beitrags, für die daraus entstandenen sehr wertvollen Diskussionen und für die fachlich hochstehende und redaktionell kompetente Unterstützung.

Georg A. Kopanakis, Gabor Kovacs