

Prüfung, Überwachung und Wartung von Litzenbündelseilen

Am Beispiel der Elbebrücke Schönebeck

Litzenbündelseile für Schrägseilbrücken stellen eine wartungsfreundliche Bauweise dar, welche bei der Elbebrücke Schönebeck beispielhaft eingesetzt wurde. Nach abgeschlossenem Seileinbau wurden verschiedene Prüfungen durchgeführt, die zum Teil durch die Ausschreibung als Abnahmeprüfung gefordert waren oder zum anderen Teil als Referenzmessungen für zukünftige Bauwerksprüfungen dienen.

Zur Seilkraftbestimmung kamen Schwingungsmessungen zur Anwendung, die unter besonderer Berücksichtigung der Biegesteifigkeit ausgewertet wurden. Die Schwingungsmessungen wurden auch hinsichtlich des Dämpfungsverhaltens der Seile ausgewertet. Für eine einfache Kraftmessung während üblicher Hauptprüfungen wurden auch elektromagnetische Kraftmessensoren eingebaut.

Zur Detektion möglicher Drahtbrüche außerhalb der Verankerungen wurde ein eigens für Litzenbündelseile konzipiertes Prüfgerät eingesetzt, das durch um den Seilumfang angeordnete Magnetisierungsspulen auch bei den relativ kleinen Hüllrohrfüllungsgraden eine volle Magnetisierung und damit eine Ortung von Spannstahlbrüchen auch im Seilinnern zulässt.

1 Allgemeines

Prüfung, Überwachung und Wartung erfordern ein sorgfältig durchdachtes Konzept, das sich aus den Stufen der analytischen Vorüberlegungen, der Festlegung und Definition von Beobachtungs- bzw. Messaufgaben unter Verwendung von Hilfsmitteln, ihrer Durchführung, der Auswertung der Ergebnisse aus den Messaufgaben und deren Interpretation hinsichtlich der Bewertung des Bauteils zusammensetzt [1]. Dieses Konzept muss und kann nicht für alle Bauteile einheitlich sein, sondern muss auf die Bauteileigenschaften abgestimmt werden. Dieser Beitrag behandelt dabei ein speziell für Litzenbündelseile (LBS) von Schrägseilbrücken entwickeltes Konzept.

Schrägseilen kommt innerhalb des Brückenbauwerks wegen ihrer exponierten Lage eine besondere Bedeutung zu. Neben ständig wirkenden Lasten müssen insbesondere aus Verkehr und Wind erhebliche Ermüdungseinwirkungen berücksichtigt werden, die zu Längs- und Querschwingungen führen können. Um diese seilspezifischen Aspekte mit den allgemeinen Regelungen für die Prüfung und Wartung von Ingenieurbauwerken (z. B. DIN 1076 [2]) in Einklang zu bringen, müssen ergänzende Überlegungen angestellt werden. Insbesondere die Forderung nach haptischer Prüfung kann bei Litzenbündelseilen nur

Testing, Monitoring and Maintenance of Parallel Strand Cables – Example: Elbe Bridge Schoenebeck

Parallel strand cables for cable stayed bridges are easy to monitor which is verified on the Elbe Bridge Schoenebeck. After cable installation, several tests were carried out that were partly required as a verification test by the bidding procedure and partly used as reference measurements for future structure inspections.

Vibration measurements that were evaluated while specifically taking into account bending stiffness were used to determine stay cable forces. The vibration measurements were also evaluated with regard to the damping behavior of the stays. Elastomagnetic force sensors were also installed to permit easy force measurement during detailed inspection.

A testing device that had been especially designed for parallel strand cables was used for detecting possible wire fractures outside of the anchorages. Thanks to magnetizing coils that are placed around the stay cable circumference, this testing device permits full magnetization even for relatively small duct filling levels and thus also ensures a detection of prestressing steel fractures within the cable.

zu einer Zustandserfassung der äußeren Verrohrung führen. Eine tatsächliche Zustandserfassung der eigentlichen Zugelemente kann damit nicht erfolgen. Deshalb wird in ZTV-ING, Teil 4, Abschnitt 4 [3] gefordert, dass projektspezifisch ein Wartungshandbuch erstellt wird, in dem insbesondere auf die Inspektion der Schrägseile eingegangen wird und alternative Verfahren zur Seilprüfung empfohlen werden können.

Am Beispiel der Elbebrücke Schönebeck (Bild 1) sollen die gewählten Prüfverfahren im Einzelnen vorgestellt werden. Die Elbebrücke Schönebeck setzt sich aus zwei Vorlandbrücken und den Seitenfeldern der Strombrücke sowie dem Flussfeld mit den Schrägseilen zusammen. Der Überbauquerschnitt der Strombrücke besteht aus dem trapezförmigen Stahlhohlkasten mit durchgehendem Deckblech und seitlichen Stahlkonsolen sowie den hierauf aufliegenden Halbfertigteilen aus Beton und der über die gesamte Breite betonierten Fahrbahnplatte [4]. Im Abstand von 18 m ragen seitlich über den Regelquerschnitt die Seileinleitungsquerträger hinaus, die verbunden mit der fächerförmigen Aufspreizung der 18 Seilgruppen vom 75,30 m hohen Pylon auf den Überbau jeweils eine neue Geometrie vorgeben. Zur Anwendung kamen Litzenbündelseile des Typs DYNA Grip® der Firma DYWIDAG-Systems International GmbH.



Bild 1 Elbebrücke Schönebeck
Elbe Bridge Schönebeck

2 Beschreibung Litzenbündelseile

Gemäß Begriffsbestimmung der neuen ZTV-Ing Teil 4, Abschnitt 4 ist ein Litzenbündelseil wie folgt definiert: „Zugglied bestehend aus parallelen Schrägseillitzen mit Verrohrung und beidseitiger Verankerung“. Die Schrägseillitzen bestehen hierbei aus sieben verzinkten kaltgezogenen glatten Einzeldrähten mit kreisförmigem Querschnitt. Die zu einer Litze verseilten Drähte sind ringsum von einem Korrosionsschutzwachs umgeben und die gesamte Litze ist mit einem eng anliegenden PE-Mantel ummantelt (Bild 2). In Deutschland werden eine Nennzug-

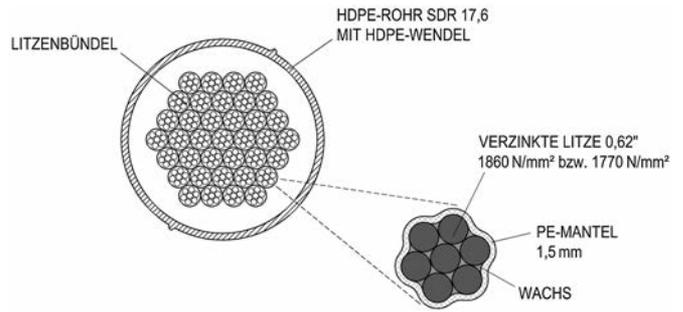


Bild 2 Querschnitt Litzenbündelseil in freier Seillänge
Cross section of parallel strand cable in free length

festigkeit von 1770 N/mm² und ein Nenndurchmesser der Litze von 15,7 mm verwendet. Der maximale Außendurchmesser der PE-ummantelten Litze beträgt 19,5 mm.

Für die Elbebrücke Schönebeck wurde als Hüllrohr ein dickwandiges witterungsbeständiges HDPE-Rohr im Farbton Signalweiß RAL 9003 gewählt. Eine außen liegende, ca. 3 mm hohe PE-Wendel verhindert weitestgehend regen- und windinduzierte Schwingungen der Seile. Die DYNA Grip® Verankerung bietet die Möglichkeit, einzelne Litzen eines Seiles auszuwechseln und den Verankerungsbereich zu inspizieren. Sie besteht im Wesentlichen aus einem Ankerblock, in dem die Schrägseillitzen mit dreiteiligen, statisch wie dynamisch hochbelastbaren Keilen verankert werden. In einem an den Ankerblock angeschweißten kurzen Stahlrohr ist eine Dichteinheit, bestehend aus drei Dichtscheiben aus Gummi, einem Abstandhalter aus HDPE und einer Andruckplatte aus Stahl, untergebracht. Die wasserundurchlässige Dichteinheit dient nicht nur dem Korrosionsschutz der Verankerung, sie gewährleistet auch eine geradlinige Führung der Litzen in den Ankerblock und minimiert dadurch Biegespannungen der Litze im Bereich der Keilverankerung.

In Bild 3 ist ein verstellbarer Spannanker dargestellt. Auf dem runden Ankerblock mit äußerem Trapezgewinde wird eine Ringmutter aufgeschraubt, welche sich auf der mit dem Bauwerk verbundenen Auflagerplatte abstützt.

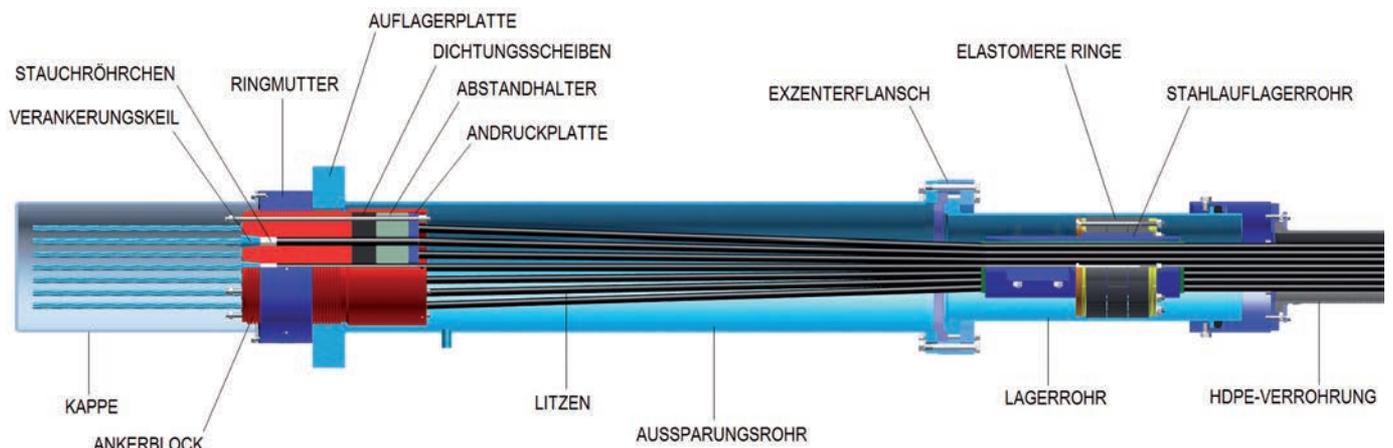


Bild 3 DYNA Grip® Verankerung
DYNA Grip® Anchorage

Beim Festanker liegt die runde Ankerplatte direkt auf der Auflagerplatte auf.

In einem gewissen Abstand zur Verankerung wird das im Auflagerbereich aufgeweitete Litzenbündel mit einem mit PE-Einlagen ausgekleideten Stahlauflegerrohr auf die engste Packung gebracht und in die Verrohrung geführt. Um das Stahlauflegerrohr herum befinden sich Elastomerringe, die mittels Flanschringen gegeneinander verspannt werden. Über dieses vormontierte Führungselement wird ein äußeres Lagerrohr geschoben, welches kraftschlüssig mit dem Bauwerk über eine Exzenterflanschverbindung verschraubt wird, sodass ein nahezu steifes Widerlager für die weichen Elastomerringe erzeugt wird. Diese viskoelastische Festhaltung hilft Seilschwingungen zu dämpfen und reduziert die Seilbiegung im Auflagerbereich. Über den Exzenterflansch werden eventuelle Bauwerkstoleranzen ausgeglichen, sodass auf das Bündelungselement keine Querbelastungen unter ständigen Lasten wirken. Zum Schutz vor Korrosion werden Stahlkappen an den Verankerungen angebracht und mit einer Korrosionsschutzmasse gefüllt. An den Aussparungsrohren der Deckverankerungen sind Öffnungen zur Entwässerung vorgesehen; sie bieten außerdem auch die Möglichkeit, den Verankerungsbereich z. B. endoskopisch zu inspizieren.

Im Gegensatz zu vollverschlossenen Seilen werden Litzenbündelseile im Regelfall in einzelnen Komponenten auf die Baustelle geliefert und mit leichten Geräten vor Ort montiert. Die Litzen werden bereits beim Hersteller mit fertigem und wartungsfreiem Korrosionsschutz versehen und auf Holzhaspeln zur Baustelle geliefert. Die Fest- und Spannanker werden vormontiert und vor Beginn der eigentlichen Seilmontage am Bauwerk befestigt. Die HDPE-Verrohrung wird als Stangenware auf die Baustelle geliefert und mittels Spiegelschweißgerät auf die erforderliche Länge verschweißt.

Bei der Elbebrücke Schönebeck wurde die auf dem Überbau vorbereitete PE-Verrohrung mithilfe des vorhandenen Turmdrehkrans und der ersten Litze in die Schräglage gebracht und diente somit als Führungskanal zum Einbau der weiteren Litzen, welche einzeln mithilfe von



Bild 4 Litzenmontage
Installation of strands

Spezielseilwinden direkt von der Holzhaspel in die Verrohrung eingezogen wurden (Bild 4). Unmittelbar nach dem Einbau einer einzelnen Litze wurde diese mithilfe des patentierten ConTen-Litzenspannverfahrens [5] derart gespannt, dass sämtliche Litzen eines Bündels im Rahmen der zulässigen Toleranzen von $\pm 2,5\%$ nahezu die gleiche Kraft haben. Anschließend wurden alle Litzen eines Bündels in einer 2. Spannstufe auf die Sollkraft gespannt. Nach Lückenschluss der Brücke und erfolgter Gradientenkorrektur (3. Spannstufe) wurden die Litzen gebündelt, die Verrohrung der Seile am Pylon und am Überbau angeschlossen und die Kappen an den Verankerungen angebracht und mit Korrosionsschutzmasse injiziert. Für die Litzenbündelseile wurde ein Prüf- und Wartungshandbuch erstellt, das Hinweise für künftige Seilprüfungen und Wartung enthält.

3 Schwingungsmessungen Seile

3.1 Vorbemerkungen

In der Bauausschreibung war als Abnahmeprüfung die Ermittlung der ersten beiden Eigenfrequenzen und der Dämpfung der Schrägseile gefordert sowie die Ermittlung der Eigenfrequenzen und der Durchbiegung des Brückentragwerks. Zusätzlich waren die Funktionalität der Elastomerringe an ausgewählten Schrägseilen zu prüfen und die Seilkräfte aller Schrägseile zu erfassen. Zur Realisierung der Aufgabenstellung kamen Beschleunigungssensoren und ein vor Kurzem entwickeltes Kamerasystem zum Einsatz. Ziel war es, die Messungen mit minimalem Aufwand und ohne Beeinträchtigung der Fertigstellungsarbeiten durchzuführen.

Die Messungen an den Schrägseilen erfolgten mittels eines dreidimensionalen Beschleunigungsaufnehmers in handlicher kompakter Form. Zur Befestigung am Schrägseil wurde ein spezielles Aluprofil verwendet, welches für eine Montage auf verschiedensten Seiltypen und Durchmessern geeignet ist. Die Montage am Schrägseil erfolgte mit einem herkömmlichen Spanngurt (Bild 5). Diese einfache Konstruktion ermöglichte eine schnelle Montage und Demontage des Sensors sowie einen raschen Wechsel zwischen den einzelnen Schrägseilen, wodurch die Totzeiten zwischen den Messungen gering gehalten werden konnten.

Die Position der Beschleunigungssensoren wurde in Verankerungsnähe im Abstand von ca. 1 m zum Ende der Antivandalismusverrohrung gewählt, um auf kostspielige Hubeinrichtungen und Steiger verzichten zu können. Es wurden sowohl Messungen mit ambienter Anregung (aus Wind und Bauverkehr) durchgeführt, um das natürliche Schwingungsverhalten der Schrägseile zu erfassen, als auch Messungen mit manueller Anregung (erzwungene Schwingung per Hand). Anhand dieser Messreihen konnten die Charakteristika Eigenfrequenzen, Eigenschwingungsformen, freie Schwingungslänge der Schrägseile, Dämpfungswerte und Seilkräfte aller 36 Schrägseile ermittelt werden (Details zum Ermittlungsverfahren vgl. Abschn. 3.2 und 3.3).



Bild 5 Sensormontage am Schrägseil
Installation of sensor on cable

An mehreren Schrägseilen wurden Messungen vor und nach dem Aktivieren der Elastomerringe durchgeführt und so deren Funktion und Wirkungsgrad in Hinblick auf die Schwingungsdämpfung ermittelt. Die Funktionalität der eingebauten elastomeren Lager konnte auf diesem Wege (höherer Dämpfungskoeffizient bei installierten Elastomerringen) nachgewiesen werden. Die Messungen am Brückendeck erfolgten mit zwei hochauflösenden Beschleunigungssensoren zur Erfassung von Frequenzen ab 0 Hz. Der Referenzsensor wurde bei 40 % der Länge des Stromfeldes positioniert, um die ersten Eigenfrequenzen erfassen zu können. Gleichzeitig wurde der zweite Beschleunigungssensor an mehreren charakteristischen Positionen am Stromfeld und den Vorlandtragwerken positioniert. Es wurden nur ambiente Messdatenfiles erstellt, da eine Anregung des Brückendecks technisch sehr aufwendig ist und die Eigenfrequenzen dennoch sehr gut ermittelt werden konnten.

Die Beschleunigungsaufnehmer für die Messungen an den Schrägseilen sowie für die Messungen am Brückendeck wurden an einem robusten und für Außeneinsätze kreierten Datenlogger und einem Laptop angeschlossen. Mit dem Softwareprogramm Green Eye Recorder wurden die Messdaten mit den jeweils erforderlichen Messparametern (Samplingrate von 100 Hz, Messdauer, Offsetparameter, FFT-Modus, etc.) aufgezeichnet und gespeichert. Das gesamte Messsystem arbeitet autark über eingebaute Pufferbatterien. Für einen längeren Einsatz vor Ort wurde ein Stromgenerator zur Überbrückung mitgeführt.

Für die Durchbiegungsmessung wurde ein vor Kurzem entwickeltes Kamerasystem eingesetzt. Die hochauflösende Digitalkamera wurde am Festpunkt (Achse Pylon) am Randbalken positioniert. Das Zielfeld (schwarzer Kreis mit Durchmesser 300 mm auf weißem Hintergrund) zur Erfassung der Bewegungen in horizontaler und vertikaler Richtung wurde in Feldmitte des Stromfeldes über der Elbe platziert. Eine eigens für diese hochauflösende Kamera entwickelte Software ermittelte die Lageänderungen des Kreises aufgrund des Schwarz-Weiß-Kontrastes des Zielfeldes, wodurch alle Bewegungen des Bauwerks aufgrund von äußeren Lasten im Millimeterbereich dokumentiert werden können. Wesentlich ist, dass sich das Kamerasystem während des maßgebenden Ereignisses in Ruhe befindet. Mit der Kamera wurden zu Beginn ambiente Messdatenfiles erstellt und anschließend konnte die Durchbiegung des Brückentragwerks bei Überfahrt eines Lastkraftwagens mit bekanntem Eigengewicht von 16,5 t aufgezeichnet werden (Bild 6). Dadurch konnten die theoretisch ermittelten Werte gleicher Größenordnung überprüft werden.

3.2 Seilkraftbestimmung

Das Grundprinzip lässt sich vereinfacht auf ein klassisches Saiteninstrument (z. B. Gitarre) zurückführen. Er-

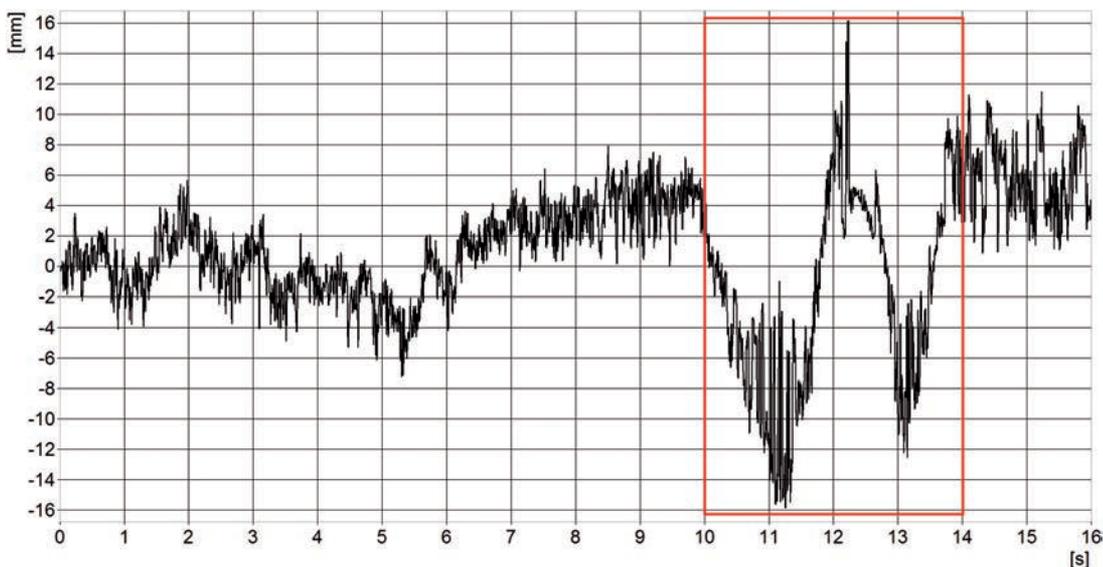


Bild 6 Durchbiegungsmessung mit Kamerasystem (eingerahmt Überfahrt des Versuchsfahrzeuges)
Measurement of deflection by means of a camera system (the marking refers to the passage of an experimental vehicle)

folgt bei einer Gitarrensaite durch Drehen der Stimmräder eine Veränderung der Spannung in der Saite, so ändert sich auch die zugehörige Tonlage (= Eigenfrequenz). Die gleichen Zusammenhänge kommen auch hier zur Anwendung. Durch den Frequenzbereich des Sensors sowie die Einstellungen bei der Messdatenaufzeichnung können Eigenfrequenzen bis in einen Bereich von 50 Hz zuverlässig bestimmt werden. Aus den vorliegenden Messergebnissen wurden mittels einer Fast-Fourier-Transformation (FFT) die ersten 10 bis 15 Eigenfrequenzen der Schrägseile ermittelt. Das Spektrum in Bild 7, welches die Schwingungsantwort des Seiles im Frequenzbereich darstellt, zeigt dann sehr klar die einzelnen Eigenfrequenzen.

Der traditionellen Berechnung der Seilkraft wird zugrunde gelegt, dass ein linearer Zusammenhang ($f_1 = \text{Grundfrequenz}$, $f_2 = 2 \cdot f_1$, $f_3 = 3 \cdot f_1$, usw.) zwischen Grund- und Oberschwingungen gegeben ist. Dieser lineare Verlauf entspricht dem Verhalten eines straff gespannten Drahtes (ideales Seil) ohne Durchhang aufgrund von Eigengewicht und ohne Biegesteifigkeit. Für einen solchen idealen Draht kann die Eigenfrequenz bzw. die Seilkraft wie folgt aus dem sehr einfachen Zusammenhang bestimmt werden [6]:

$$f_{ks} = \frac{k}{2L} \cdot \sqrt{\frac{H}{\mu}} \quad (1)$$

mit:

- f_{ks} Eigenfrequenz mit der Ordnung (k)
- L Länge
- μ Masse des Litzenbündelseiles [kg/m]
- H wirksame Seilkraft

Für Schrägseile im Brückenbau ist diese vereinfachte Annahme jedoch nicht gültig, da sich durch Eigengewicht, Biegesteifigkeit und Randbedingungen (Lagerungsbedingungen) Differenzen ergeben. Erst durch Einbeziehung dieser Effekte in die Berechnung der Seilkraft können ge-

naue Werte erzielt werden. Aus diesem Grund ist die Berechnung der wirksamen Seilkraft deutlich aufwendiger.

Maßgeblichen Einfluss auf das Verhalten eines realen Seiles übt dabei die Biegesteifigkeit aus, wobei der einfache Zusammenhang zwischen Eigenfrequenz und Seilkraft nicht mehr gültig ist. Die Abweichung der Eigenfrequenzen vom idealen (linearen) Verlauf zeigt sich deutlich, wenn die Ordnung der Eigenfrequenzen dem entsprechenden k-ten Eigenfrequenzwert gegenübergestellt wird. Zwischen den ersten Eigenschwingungsformen ($\sim f_1$ – f_5) stellt sich meist ein linearer Zusammenhang ein, während für die Eigenfrequenzen höherer Ordnung bereits deutlich ein abweichender Trend von der idealen Geraden erkennbar ist.

Im Allgemeinen werden daher das dynamische Verhalten eines Schrägseiles durch die Zugkraft sowie die Biegesteifigkeit des Querschnitts beschrieben, wodurch für ein reales Schrägseil mit Zugkraft und Biegesteifigkeit eine Näherungslösung für die Eigenfrequenz mit

$$f_k = \frac{k}{2L} \cdot \sqrt{\frac{N}{\mu}} \cdot \left(1 + 2 \cdot \sqrt{\frac{EI}{N \cdot L^2}} + \left(4 + \frac{k^2 \pi^2}{2} \right) \cdot \frac{EI}{N \cdot L^2} \right) \quad (2)$$

bestimmt wird.

mit:

- k Ordnung der Eigenfrequenz
- L Seillänge [m]
- N wirksame Seilkraft [N]
- EI Biegesteifigkeit des Seiles, wobei
- E Elastizitätsmodul des Seiles [N/mm²]
- I Trägheitsmoment des Seiles [mm⁴]

Neben dem Frequenzverlauf hat insbesondere auch die freie Schwingungslänge L einen maßgebenden Einfluss auf die bestimmte Seilkraft. Durch zusätzliche Messungen mit einem Referenzsensor und einem wandernden Sensor konnte die freie Schwingungslänge über Bestimmung der Eigenschwingungsform (Nulldurchgang) der

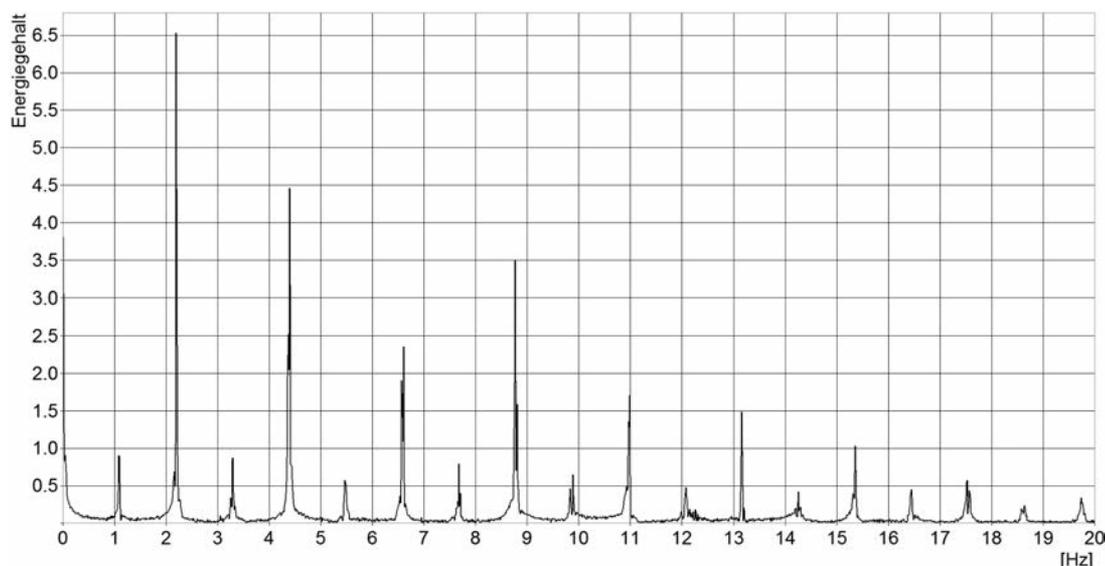


Bild 7 Repräsentatives Eigenfrequenzspektrum eines Litzenbündelseiles
Representative spectrum of eigenfrequency of a cable

Schrägseile ermittelt werden. Dadurch konnten die Seilkräfte verlässlich ermittelt werden.

3.3 Dämpfung

Ein weiterer maßgebender Parameter bei Schrägseilen ist die Dämpfung. Durch die manuelle Anregung konnte für jedes Schrägseil das Ausschwingverhalten festgehalten werden (Bild 8). Es wurden die Messergebnisse mit manueller Anregung mittels eines Bandpassfilters für die jeweils ausgewählten Eigenfrequenzen (f_1, f_2, f_3) gefiltert und anschließend die zugehörigen Ausschwingzeiten ermittelt. Im nächsten Schritt erfolgte die Anpassung einer logarithmischen Hüllkurve, um den exponentiellen Dämpfungsverlauf zu erfassen und den Dämpfungskoeffizienten mit folgender Formel zu ermitteln:

$$\zeta(t) = x_1 \cdot e^{-2 \cdot \pi \cdot f \cdot \zeta_0 \cdot t} \tag{3}$$

mit:

- $\zeta(t)$ Exponentieller Dämpfungsverlauf
- x_1 Anfangsamplitude der Schwingungsmessung
- f die Eigenfrequenz der betrachteten Eigenschwingungsform
- ζ_0 Dämpfungskoeffizient
- t Ausschwingzeit

Der Dämpfungskoeffizient ζ_0 stellt den zu ermittelten Parameter dar, welcher das Ausschwingverhalten und somit das Abklingen der Schwingungsamplitude über die Zeit wiedergibt. Auf diese Weise war es möglich, Dämpfungen für die erste Eigenform gemäß Festlegung im Leistungsverzeichnis zu ermitteln und damit die Funktion der elastomeren Lager zu verifizieren.

4 Alternative Kraftmessungen

Alternativ zur Bestimmung der Seilkraft über Seilschwingungsmessungen können Seilkräfte auch über sogenann-

te Abhebeversuche (Lift-Off Tests) oder über fest installierte Kraftmesssensoren ermittelt werden. Bei den Lift-Off Tests wird die Seilkraft über hydraulische Spannpressen ermittelt. Hierbei werden kalibrierte Monopressen auf die bereits gespannten Litzen aufgeschoben und der hydraulische Druck in der Presse so lange erhöht, bis sich der Verankerungskeil der Litze aus der Konusbohrung im Ankerblock bewegt. Nach dem Ablesen des hydraulischen Drucks wird die Litze wieder verankert. Durch die Messung von mehreren Litzen innerhalb eines Bündels kann ein Mittelwert der Litzenkräfte und daraus die gesamte Seilkraft berechnet werden. Lift-Off Tests sind jedoch als Prüfverfahren bei jeder Brückenhauptprüfung nicht geeignet, da dafür immer der komplette Korrosionsschutz des Verankerungsbereichs entfernt und nach der Prüfung wieder erneut hergestellt werden muss. Sie stellen ein Prüfverfahren dar, das nur bei Sonderprüfungen zum Einsatz kommen kann.

Bei der Elbebrücke Schönebeck wurden an sechs Seilen an der Überbauverankerung elastomagnetische DYNA Force[®] Sensoren an einzelnen Litzen montiert (Bild 9), über die Seilkräfte durch Anschluss an eine tragbare Auswerteeinheit ermittelt werden können. Die Messung basiert auf dem Prinzip, dass sich die magnetische Permeabilität des Stahls in Abhängigkeit von Temperatur und Spannung ändert [7]. An Litzen, die mit DYNA Force[®] Sensoren ausgestattet sind, wurde nach deren Einbau und vor dem Spannen eine Kalibrierung des Sensors vorgenommen, um die an der jeweiligen Sensorposition vorliegenden Eigenschaften der Litze zu berücksichtigen.

Um einen Vergleich der unterschiedlichen Kraftmessverfahren zu ermöglichen, wurden an den relevanten sechs Verankerungen der Elbebrücke Schönebeck, die mit jeweils zwei Sensoren ausgestattet sind, nacheinander Lift-Off Tests an den Litzen mit Sensor ausgeführt und im Anschluss die Litzenkräfte über die DYNA Force[®] Sensoren ausgelesen. Dies geschah je Seil nahezu zeitgleich, um Einwirkungen wie Temperatur oder Laststellungen auf der Brücke, die die Seilkraft beeinflussen können, zu minimieren.

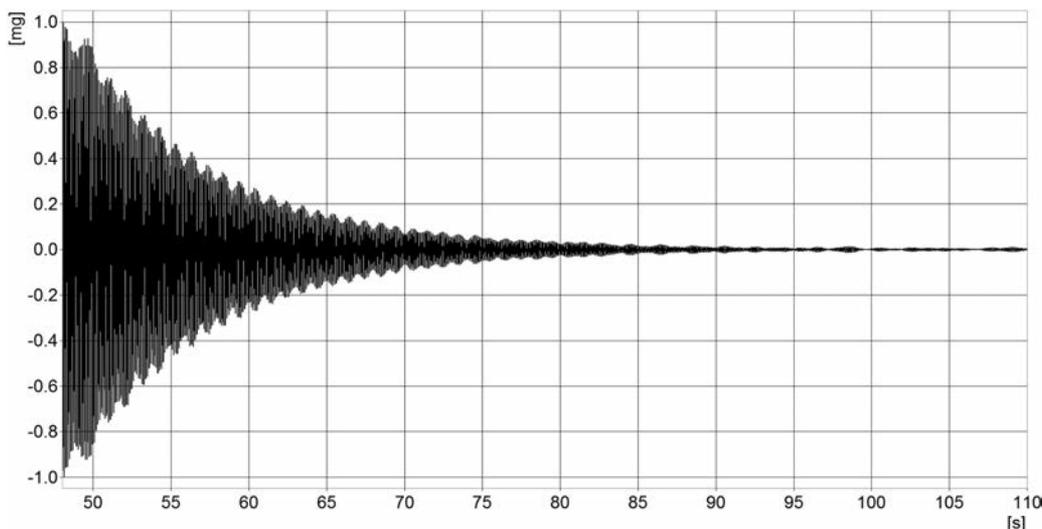


Bild 8 Repräsentativer Ausschwingvorgang – Ermittlung Dämpfungskoeffizient
Representative decay process – evaluation of damping coefficient



Bild 9 DYNForce® Sensor
DYNForce® Sensor

Die ermittelten Abweichungen der Sensoren zu den hydraulisch errechneten Kräften je Litze der Lift-Off Tests lagen im Bereich von $-1,3\%$ bis $+2,6\%$ mit einem Mittelwert von $+0,5\%$. Um repräsentative Ergebnisse zu erhalten, sollten mindestens zwei Sensoren je zu überwachendem Seil zum Einsatz kommen, um ähnlich wie bei Lift-Off Tests einen Durchschnittswert der Litzenkraft je Seil bilden zu können.

DYNForce® Sensoren stellen eine gute Monitoring-Möglichkeit dar, um Seilkräfte zu überwachen und gegebenenfalls Unregelmäßigkeiten festzustellen. Da die Sensoren während der eigentlichen Seilmontage mit eingebaut werden, entfällt somit der ansonsten für spätere Lift-Off Tests nötige Zugang zu einzelnen Litzen und vereinfacht die Überwachung. Bei dem Einsatz einer großen Zahl an Sensoren bietet sich das Einrichten eines oder mehrerer Auslesepunkte an. Das Auslesen der Sensorenwerte kann an diesen Punkten mittels einer zentralen Ausleseeinheit geschehen. Somit wird der Einsatz der DYNForce® Sensoren noch effizienter. Mögliche Fernwartung dieser Auslesepunkte stellt eine weitere Vereinfachung dar.

5 Magnetinduktive Seilprüfung

PE-ummüllte Litzen- und Paralleldrahtsysteme stellen – was die zerstörungsfreie Prüfung des vollständigen metallischen Querschnitts angeht – besonders hohe Anforderungen an die magnetinduktive bzw. elektromagnetische Prüfung. Sowohl die großen metallischen Seilquerschnitte als auch der relativ geringe Füllfaktor (also das Verhältnis zwischen Hüllrohrdurchmesser und metallischem Seilquerschnitt) erfordern extrem starke Magnetfelder. Die Erzeugung von derart starken Magnetfeldern ist nicht mehr durch Permanentmagnete möglich, sondern wird durch entsprechend leistungsstarke Magnetisierungsspulen realisiert. Um diese Magnetfelder in das zu prüfen-

de LBS einzukoppeln, bedarf es ebenfalls großer metallischer Rückschlussmassen. Zudem erfordern die großen Hüllrohrdurchmesser der LBS auch eine größere Anzahl von Sensoren, welche ringförmig in den Prüfköpfen angeordnet sind. Die Handhabung von derartigen Prüfgeräten und die Interpretation der erhaltenen Daten ist nur durch erfahrene Prüfer und Techniker zu realisieren, die im Vorfeld alle systemrelevanten Variablen an 1:1-Modellen unter realistischen Bedingungen untersuchen bzw. verifizieren und das Prüfsystem entsprechend anpassen können.

Um ein derartiges Prüfsystem zu entwickeln, haben sich die DMT-Seilprüfstelle aus Bochum, die EMPA aus Dübendorf und die Alpin Technik und Ingenieurservice GmbH aus Leipzig zu einer Kooperation entschlossen. Das Ergebnis ist ein modulares elektromagnetisches Prüfgerät für Seildurchmesser bis 250 mm (Bild 10). DSI hat in der Entwicklungsphase, um realistische Testbedingungen zur Verfügung zu haben, ein PE-ummülltes Litzenbündel zur Verfügung gestellt, welches an verschiedenen Querschnittspositionen bis hin in die Querschnittsmitte mit entsprechend künstlich erzeugten Drahtbrüchen ausgestattet war. Da gerade in Litzenbündel- und Paralleldrahtbündelsystemen jeder Draht gleich viel trägt, kommt der Fähigkeit, ein Seil bis zur Sättigung zu magnetisieren, besondere Bedeutung zu. Es stehen am Markt deutlich leichtere Systeme zur Verfügung, die jedoch nur die oberflächennahen Drahtlagen mit Einschränkungen prüfen können. Diese Systeme eignen sich für die vollständige Seilprüfung von zuvor genannten Systemen nicht.

Das beschriebene Prüfsystem wurde an der Elbebrücke Schönebeck eingesetzt. Mit dem Prüfgerät für Seildurchmesser bis 250 mm wurden die 36 HDPE-ummantelten Seile bis in die Sättigung magnetisiert und damit auf eventuelle Schädstellen wie Drahtbrüche und signifikante Querschnittschwächungen geprüft. Das Prüfgerät besteht aus sechs Magnetisierungsspulen, die um das Seil herum angeordnet sind, und über Joche den Seilquerschnitt magnetisieren. Sensoren, die um das Seil herum positioniert sind, ermöglichen nicht nur die Detektion von Schädigungen, sondern auch deren ungefähre Lokalität im Querschnitt. Beim Überfahren des Seiles wird im Bereich des Prüfkopfes das Seil von Magnetlinien durchflossen, deren Feld homogen in axialer Richtung zum Seil ausgerichtet ist. Befinden sich im Seil Störstellen, die durch Drahtbrüche, Korrosion, Druck oder Verschleißstellen sowie Unregelmäßigkeiten in der Verseilung des Seiles verursacht werden, entsteht hier ein magnetisches Feld, das gegenüber dem axialen eine zusätzliche radiale Komponente besitzt, deren Größe und Art von der vorhandenen Störstelle abhängt. Wird das Seil bis in die Sättigung magnetisiert, wie es bei dem eingesetzten Gerät der Fall ist, wird den radialen Feldkomponenten, die im Inneren des Seiles entstehen, von den äußeren Drahtlagen nur ein geringer Widerstand entgegengesetzt. Diese radialen Feldkomponenten können so ohne starke Schwächung aus dem Seil heraustreten und durch entsprechende Sensoren im Prüfkopf erfasst werden.

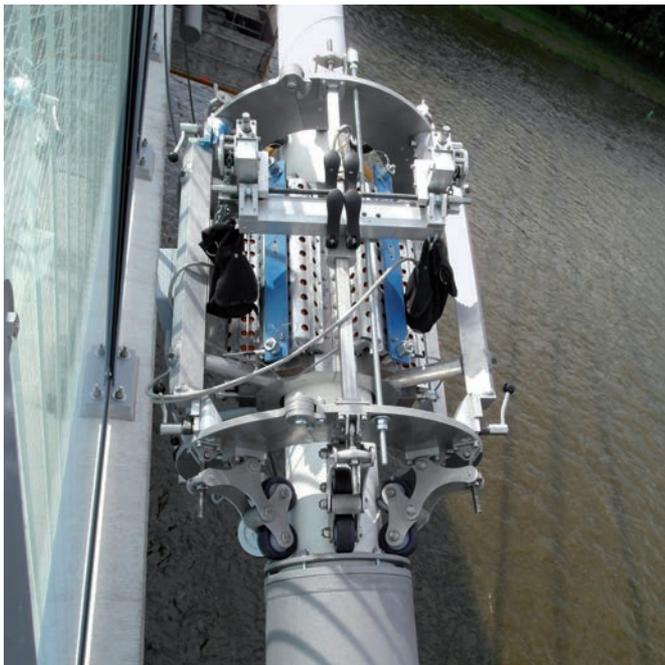


Bild 10 Prüfgerät zur magnetinduktiven Seilprüfung
Device for magneto inductive cable testing

Das Gerät wiegt ca. 250 kg, besteht aus drei Teilen und ist mit einem eigenen Hubsystem ausgestattet, welches die Montagearbeiten unterstützt. Die Datenspeicherung erfolgt direkt am Gerät, während per Funk der ordnungsgemäße Prüfverlauf inkl. Datenspeicherung an einem externen PC (Bedienerplatz) kontrolliert werden kann. Eine leichte und schnell modifizierbare Plattform diente dem zügigen Auf- und Abbau, was sich in einer nur kurzen Einschränkungszeit für den Betrieb des Bauwerks auswirkte. Diese Plattform wurde längsverfahrbar ausgelegt und konnte dadurch schnell von einem Seil zum anderen positioniert werden. Um die Zugänglichkeit zu den unteren Aufsetzstellen zu verbessern und damit die Prüfdauer gering zu halten, konnte der obere Teil der Plattform in Querrichtung unter das zu prüfende Seil verschoben werden. Eine ebenfalls an der Plattform installierte Hubeinrichtung ermöglichte die unkomplizierte Montage und Demontage des insgesamt 250 kg wiegenden Gerätes (Bild 11). Besonderes Augenmerk wurde behördlicherseits auf die sichere Ausführung der Arbeiten im absturzgefährdeten Bereich auf der Arbeitsplattform gelegt. Da die Plattform aber von vornherein mit geeigneten Anschlagpunkten für die persönliche Schutzausrüstung ausgestattet war, stellte dies kein Problem dar.

Vor der Prüfung wurde auf jedem Seil (Hüllrohr) ein sogenannter Kalibrierdraht fixiert. Da der Abstand des Kalibrierdrahtes zum Seilaustrittspunkt bekannt ist, kann das durch den Kalibrierdraht hervorgerufene Signal zur genauen Bestimmung des Startpunktes der jeweiligen Messung herangezogen werden. Gleichzeitig kann anhand des Signals sowohl die ordnungsgemäße Funktion der Prüfeinrichtung als auch eine Kontrolle der Magnetisierung erfolgen. Um das Prüfgerät am Seil entlang zu bewegen, wurde eine speziell entwickelte, leichte Textildurch-

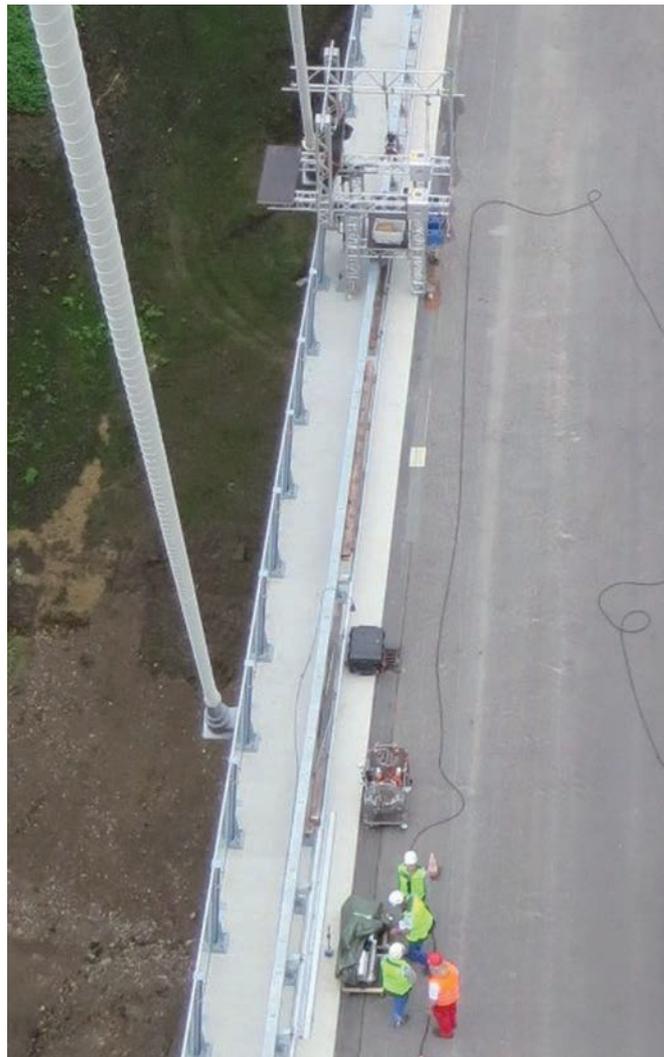


Bild 11 Längsverfahrbare Montageplattform zum Anbringen des Prüfgeräts
Movable platform for installation of testing device

laufwinde genutzt, die bei hoher Geschwindigkeit hohe Lasten ziehen kann. Diese Art der Zugvorrichtung ermöglicht nicht nur einen sehr schnellen Aufbau, sondern verhindert auch mögliche Schädigungen am Bauwerk durch die Verwendung von Stahlseilen. Die durchschnittliche Prüfleistung lag bei fünf Seilen pro Tag. Das Ergebnis war ein nach DIN EN ISO 17025 [8] ausgestellter Prüfbericht durch einen anerkannten Sachverständigen.

Magnetinduktive Prüfungen werden in der Regel zur Erstprüfung aller Seile als Ergänzung zur visuellen Untersuchung herangezogen. Sollten keine entsprechenden Indikationen eine intensivere Folgeuntersuchung erfordern, geht man davon aus, dass ein Drittel aller Seile jeweils zur anstehenden Hauptuntersuchung alle sechs Jahre magnetinduktiv geprüft wird.

6 Sonstige Seilprüfungen

Die visuelle Prüfung ist die Basis aller weiteren Prüfmaßnahmen. Dabei steht nicht nur das Auffinden von Defekten im Vordergrund, sondern auch die Dokumentation

von Bereichen, die nach aktueller Sicht noch keine Defekte darstellen, aber die Möglichkeit zur Entwicklung von kritischen Stellen aufweisen. Die Dokumentation der Prüfleistung und der besichtigten Bereiche stellt bei der Seilprüfung eine erhebliche Herausforderung dar, da es gilt, große Flächen bzw. lange Bereiche optisch nachvollziehbar und reproduzierbar darzustellen.

Um diesem Problem zu begegnen, werden automatische Kamerasysteme eingesetzt, die hochauflösende Panoramabilder in Originallänge des zu begutachtenden Bauteils erzeugen (Bild 12). Diese Bilder können dann mit entsprechenden Betrachtungsprogrammen ausgewertet und jederzeit miteinander verglichen werden. Die Datenerfassung vor Ort erfordert nur noch einen Bruchteil der bisherigen Prüfdauer und spart somit Zeit, minimiert Verkehrsbeeinträchtigungen und dementsprechend Kosten.

Ultraschallverfahren eignen sich besonders für die Prüfung des Verankerungsbereichs. Bei den Litzenbündelseilen wird dabei von der Stirnfläche der Einzeldrähte der Litzen bis in ca. 1,4 m in Spannrichtung eingeschallt. Eventuell vorhandene Drahtbrüche bzw. Drahtanrisse sowie größere Korrosionsschäden erzeugen dabei Signale, die entsprechend Amplitude und Form ausgewertet werden können. Im Verankerungsbereich von vollverschlossenen Seilen kann die Ultraschallprüfung nur in den äußeren Drahtlagen bis zu ca. 40 mm in die Verankerung (Verguss) hinein erfolgen. Da diese Bereiche besonders biegebeansprucht sind, ist eine entsprechende Prüfung je nach Bauwerkserfordernis sinnvoll.

Als weiteres Verfahren ist die Endoskopie aufzuführen. Die neuesten Entwicklungen bei hybriden Korrosionsschutzverfahren, die neben der dauerhaft dichten Umhüllung des Tragseiles (z. B. Seilbündel) eine Luftentfeuchtungsanlage vorsehen, bieten, was die Inspektion angeht, eine vollkommen neue Chance. Über die gesamte freie Länge können mit einem Endoskop große Teile der außen liegenden Drähte um den gesamten Umfang optisch einwandfrei inspiziert werden.

7 Wartung

Für jede Schrägseilbrücke sollte ein separates Prüfhandbuch für die Seile erstellt werden, in dem nicht nur Prüfintervalle, Prüfmethoden und Prüfumfang beschrieben, sondern auch Hinweise zu den möglichen Reparaturmethoden der einzelnen Seilkomponenten angegeben werden. Für Litzenbündelseile werden im Allgemeinen keine regelmäßigen Wartungsarbeiten vorgeschrieben.

Die freie Seillänge kann durch die werkseitig aufgebrachte PE-Ummantelung der verzinkten und gewachsenen Litzen als dauerhaft korrosionsschutz und damit als komplett wartungsfrei betrachtet werden. Es werden hier keine organischen Beschichtungen verwendet, die meist nur eine Lebensdauer von bis zu 30 Jahren aufweisen. Sollten sich im Rahmen der Seilprüfung dennoch Auffälligkeiten zeigen

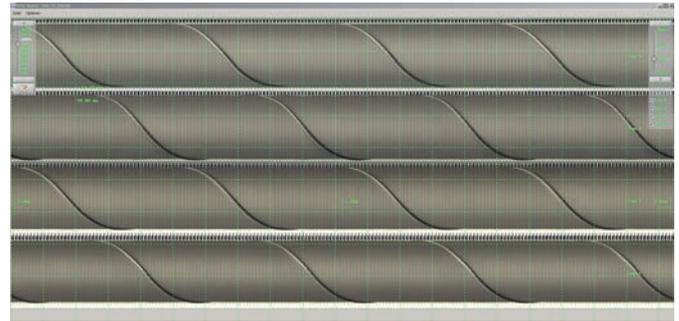


Bild 12 Abwicklung einer Schrägseilverrohrung mit externer Wendel, Aufnahmen aus Kamerabefahrung
Picture development of a cable sheathing with external helix, pictures taken by cable robot

oder treten mechanische Beschädigungen z. B. durch einen Anprall auf, können beim Litzenbündelseil vom Typ DYNA Grip® einzelne Litzen komplett ausgetauscht werden. Aufgrund des modularen Aufbaus dieser Seile können derartige Arbeiten mit leichten Montagegeräten und ohne große Behinderung des Verkehrs ausgeführt werden.

Die Verankerungen und Übergangsbereiche von der freien Seillänge zur Verankerung bestehen aus duplexbeschichteten Stahlteilen. Um hier eine möglichst lange Lebensdauer zu erreichen, wird der erforderliche Korrosionsschutz dieser Teile meist mit „C5-M/I Schutzdauer hoch“ gemäß DIN EN ISO 12944-5 [9] spezifiziert. Die erforderlichen Wartungsarbeiten sind analog zum üblichen Stahlbau und orientieren sich an den während den Hauptprüfungen festgestellten Schadensbildern.

Besondere Aufmerksamkeit gilt der Dichtigkeit der Verankerungen, um den dauerhaften Korrosionsschutz der Litzen im Bereich der Verankerung und der Verankerungskeile zu gewährleisten. Die Dichtigkeit musste bereits im Rahmen der Eignungsprüfung mit einem Dichtigkeitsversuch gemäß fib Bulletin 30 [10] demonstriert werden. Sollten sich im Rahmen der Hauptprüfungen dennoch Undichtigkeiten zeigen, so kann bei der speziellen Konstruktion der DYNA Grip® Verankerungen die Quetschdichtung über das Nachziehen von Gewindestangen erneut aktiviert werden.

Im Bereich der Führungskonstruktion der LBS befinden sich elastomere Ringe, welche über Gewindestangen vorgespannt und in Eignungsprüfungen umfangreich auf Ermüdung getestet worden sind. Die Lebensdauer dieser besonderen Bauart kann nur schwer abgeschätzt werden, jedoch ist aufgrund der geringen Beanspruchung und des guten Schutzes vor äußeren Einwirkungen wie Ozon oder UV mit einer Lebensdauer von weit über 30 Jahren zu rechnen. Sollten im Zuge der Hauptprüfung Unregelmäßigkeiten festgestellt werden, so kann die Vorspannung der Ringe wiederhergestellt oder ein Austausch der Ringe mit einfachen Mitteln durchgeführt werden.

Schrägseile gelten allgemein als anfällig gegenüber diversen Arten von Schwingungen. Mit theoretischen Untersu-

chungen im Vorfeld können effektive Dämpfungsmaßnahmen ermittelt werden, es ist aber nicht zielsicher vorhersehbar, ob diese Dämpfungsmaßnahmen tatsächlich erforderlich sind. Bei der Elbebrücke Schönebeck wurden Maßnahmen ergriffen, die das Risiko von Seilschwingungen reduzieren: Anordnung der Seilführungsstruktur mit dämpfenden Eigenschaften und Anordnung einer Wendel auf der PE-Verrohrung zur Vermeidung von regen- und windinduzierten Seilschwingungen. Zusätzlich wurden Anschlusspunkte am Seil und am Überbau vorgesehen, die gegebenenfalls den nachträglichen Einbau von hydraulischen Schwingungsdämpfern leicht ermöglichen [11].

8 Zusammenfassung und Ausblick

Die dargestellten Prüfmethode stellen eine produktbezogene und zeitgemäße Beurteilungsmethode von Litzenbündelseilen dar. Der Zustand der Seile kann zuverlässig und zerstörungsfrei – dank handlicher bzw. selbstfahrender Messhilfen – ohne große Verkehrsbehinderung erfasst werden. Neben der Festlegung der Prüfverfahren muss

insbesondere auch die Prüfhäufigkeit definiert werden. Dabei ist zwischen regelmäßigen Einzelprüfungen, Prüfverfahren mit kontinuierlicher Messwertaufzeichnung und daraus resultierenden Kombinationen zu unterscheiden.

Bei der Erstellung von Wartungshandbüchern sind typische Schadensbilder zu definieren, die aus den Prüfungen resultieren. Darauf aufbauend können Sanierungsvorschläge entwickelt werden, die von der punktuellen Instandsetzung bis zum Teilaustausch reichen können. Durch den modularen Aufbau von Litzenbündelseilen können auch nur Teilbereiche bei Bedarf erneuert oder durch Ergänzung von Zusatzlitzen verstärkt werden. Jeglicher Austausch von Seilkomponenten oder Einbau von zusätzlichen Litzen ist unter minimaler Verkehrsbehinderung möglich.

Mit den Erfahrungen zur Prüfung von Litzenbündelseilen können auch Konzepte für voll verschlossene Seile entwickelt werden. Alle Konzepte sollen in neue Vorschriften für Seilprüfung einfließen.

Literatur

- [1] ZILCH, K.; WEIHER, H.; GLÄSER, CH.: *Monitoring im Betonbau*. Betonkalender 2009, Berlin: Ernst & Sohn 1993.
- [2] Deutsches Institut für Normung e.V.: DIN 1076 „*Ingenieurbauwerke im Zuge von Straßen und Wegen*“. Berlin: Beuth Verlag 1999.
- [3] Bundesanstalt für Straßenwesen (BAST): *Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Ingenieurbauten ZTV-ING, Teil 4 Abschnitt 4*. BAST, Stand 2012.
- [4] BRAND, W.; ANISTOROAIEI, CH.; LANGER, S.; PULS, J.: *Elbebrücke Schönebeck – Schrägseilbrücke mit Litzenbündelseilen*. Stahlbau 82 (2013), H. 3, S. 170–178.
- [5] Patentschrift DE102008032881B3: *Vorrichtung und Verfahren zum Steuern einer Spannvorrichtung beim Spannen eines Spannglieds*. Deutsches Patent und Markenamt, 2011.
- [6] GEIER, R.: *Evolution of Stay Cable Monitoring Using Ambient Vibration*. IABSE Symposium Report, Shanghai, 2004.
- [7] MÄRZLUFT, A.; BRAND, W.: *Force Monitoring with Contact free elasto-magnetic Sensors on single strands for multi strand anchorages*. Proceedings of the Third International Symposium on Life-Cycle Civil Engineering (IALCCE'12), Vienna, Austria, October 3–6, 2012.
- [8] Deutsches Institut für Normung e.V.: DIN EN ISO 17025 „*Allgemeine Anforderungen an die Kompetenz von Prüf- und Kalibrierlaboratorien*“. Berlin: Beuth Verlag 2005.
- [9] Deutsches Institut für Normung e.V.: DIN EN ISO 12944-5 „*Beschichtungssysteme – Korrosionsschutz von Stahlbauten durch Beschichtungssysteme – Teil 5: Beschichtungssysteme*“. Berlin: Beuth Verlag 2008.
- [10] Federation Internationale du Beton (fib): BULLETIN 30 „*Acceptance of stay cable systems using prestressing steels*“. Lausanne, 2005.
- [11] WEBER, F.; DISTL, H.; NÜTZEL, O.: *Versuchsweiser Einbau eines adaptiven Seildämpfers in eine Schrägseilbrücke*. Beton- und Stahlbetonbau 100 (2005), H. 7, S. 582–589.

Autoren



Dr.-Ing. Christian Gläser
DYWIDAG-Systems International GmbH
Siemensstraße 8
85716 Unterschleißheim
christian.glaeser@dywidag-systems.com



Dipl.-Ing. Werner Brand
DYWIDAG-Systems International GmbH
Siemensstraße 8
85716 Unterschleißheim
werner.brand@dywidag-systems.com



Dipl.-Ing. Eric Kuhn
Alpin Technik und Ingenieurservice GmbH
Plautstraße 80
04179 Leipzig
kuhn@alpinechnik.de



Dipl.-Ing. Thomas Mack
Schimetta Consult
Landwiedstraße 23
4020 Linz
thomas.mack@schimetta.at