

Lebensdauer von Kranhubseilen

Hubseile sind auf mehrlagig bewickelten Trommeln gegenüber der einlagigen Bewicklung einem deutlich verstärkten Verschleiß unterworfen. Aus einem am Institut für Fördertechnik und Logistik (IFT) der Universität Stuttgart durchgeführten Forschungsvorhaben liegen erstmals umfangreiche Ergebnisse zur Lebensdauer von Hubseilen in der Mehrlagenwicklung vor. Basierend auf diesen Resultaten und durch die systematische Auswertung zusätzlicher Versuche konnte im Rahmen einer Dissertation [3] ein Berechnungsansatz für die Lebensdauer von Hubseilen in der Mehrlagenwicklung aufgestellt werden.

- Ulrich Weiskopf
- Karl-Heinz Wehking

Ausgangssituation

In unterschiedlichsten Krananwendungen (u.a. Mobilkrane, Turmdrehkrane, Krane im Offshore-Bereich) sind mehrlagig bewickelte Seiltrommeln im Einsatz (Bild 1). Durch die im Vergleich zum Lauf über Scheiben wesentlich größere mechanische Beanspruchung kommt es zu einer deutlichen Minderung der Seillebensdauer, die vor Beginn der Untersuchungen von Fachleuten auf rd. ein Drittel eingeschätzt wurde. Tatsächlich kann durch die Ergebnisse der Forschungsarbeiten „Mehrlagenwicklung“ am Institut für Fördertechnik und Logistik (IFT) der Universität Stuttgart eine deutlich höhere Lebensdauerabnahme auf nur 3 bis 10 % im Vergleich zur Rundrille nachgewiesen werden.

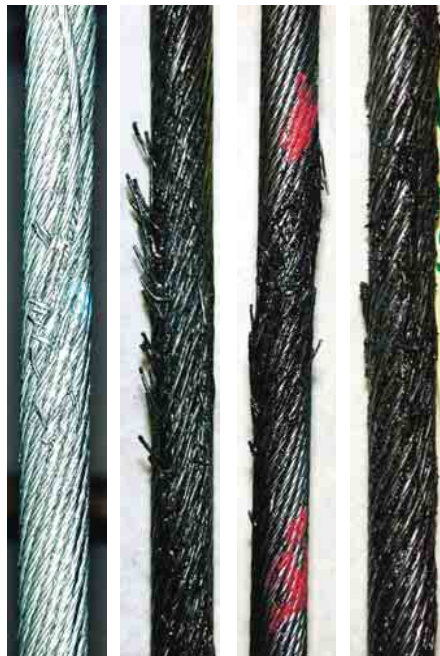
Laufende Drahtseile sind in jeder Anwendung einem mehr oder weniger starken Verschleiß unterworfen (Bild 2). Aufgrund der komplexen Spannungsverhältnisse und der unterschiedlichen Verschleißsituationen im Seil ist eine rein theoretische Berechnung der Seillebensdauer nicht möglich. Nur auf Basis experimenteller Untersuchungen lassen sich Lebensdauerprognosen mit hoher Zuverlässigkeit treffen. Für einlagige Seiltriebe stellt die Lebensdauergleichung nach Feyrer [4], die auf einer Vielzahl von Dauerbiegeversuchen basiert und durch zahlreiche Zusatzuntersuchungen ergänzt wurde, den Stand der Technik dar.

Fehlende Berechnungsmöglichkeiten für die Auslegung von Hubseilen in der Mehrlagenwicklung bedeuten im Kranbau die Anwendung hoher Sicherheitsfaktoren

und strenger Ablegekriterien. Die Folge sind wirtschaftliche Nachteile durch größere Seil- und Trommeldurchmesser, daraus wiederum folgend größere Getriebe und Antriebe sowie kürzere zulässige Aufliegezeiten. Genaue Kenntnisse über die Mechanismen der Seilschädigung, den Ablauf der Drahtbruchentwicklung sowie die Auswirkung der einzelnen seilschädigenden Parameter und der konstruktiven Eigenschaften des Seils auf die Seillebensdauer sind deshalb zur Erhöhung der Sicherheit und der Wirtschaftlichkeit der krantechnischen Anlage dringend erforderlich.



1 Hubwerk eines Turmdrehkrans mit mehrlagig bewickelter Trommel



2 Typische Drahtbrüche in der Mehrlagenwicklung

In früheren Untersuchungen [5, 6] wurde bereits der stark lebensdauermindernde Einfluss der Mehrlagenwicklung gezeigt. Zur Abschätzung wurde dort ein Abminderungsfaktor für die Lebensdauerberechnung nach Feyrer [4] aufgestellt. Im Zuge der nachfolgend beschriebenen um-

fassenderen Untersuchung wurde nachgewiesen, dass die Mehrlagenwicklung durch besondere Schädigungsmechanismen und eine erhebliche Minderung der Seillebensdauer im Vergleich zum Lauf über Scheiben einen völlig eigenständigen Schädigungsprozess darstellt. Deshalb wurde nach der Auswertung der Versuchsergebnisse eine eigenständige Lebensdauergleichung für Drahtseile in der Mehrlagenwicklung aufgestellt.

Schädigungsmechanismen und Ablegereife

Für den Seilverschleiß in der Mehrlagenwicklung sind der direkte Kontakt und die Relativbewegungen der benachbarten Seilwindungen auf der Trommel, weniger die Ermüdung infolge der Biegewechsel, verantwortlich. Nur durch Kenntnis der Schädigungsmechanismen können gezielte Maßnahmen zur Erhöhung der Seillebensdauer angewendet werden. Grundsätzlich werden drei Mechanismen unterschieden, die für die Seilschädigung verantwortlich sind (Bild 3):

► mechanischer Verschleiß:

Beim mechanischen Kontakt der Seilstränge innerhalb des gesamten Wickelpakets sowie verstärkt zwischen dem auf die Trommel auflaufenden Seilstrang und der letzten gespulten Seilwindung wird das Seil wesentlich geschädigt. Relativbewegungen zwischen den Seilsträngen beim Aufspulen bewirken Reibung. Dadurch und durch das Verhaken der Litzen und Drähte entsteht mechanischer Verschleiß.

► Pressung:

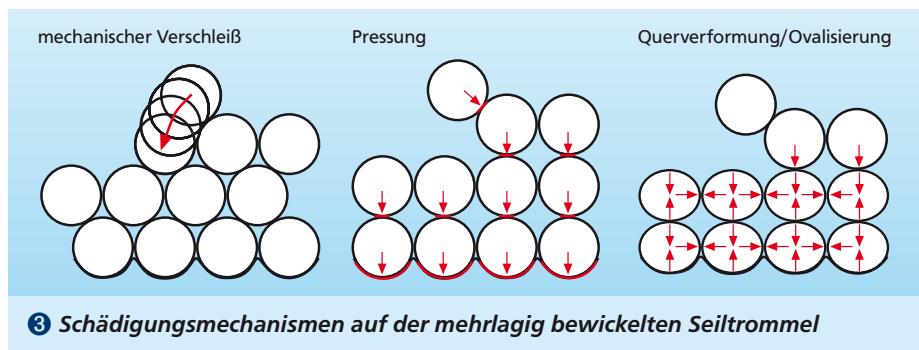
Die Schnürspannungen des unter Zugbelastung stehenden Seiles bewirken an allen Kontaktstellen der Seilwindungen im Wickelpaket hohe Pressungen. Diese verursachen an den Berührstellen der Drähte Abplattungen und Einkerbungen, woraus weitere Drahtbrüche entstehen.

► Querverformung/Ovalisierung:

Die Ovalisierung des Seiles, die hier aus der Seilzugkraft und dem Schnürdruck der nächsten Seillage resultiert, und die sich daraus ergebenden Spannungen erzeugen eine weitere Seilschädigung. Ein Seilstrang in der Steigungszone der Mehrlagenwicklung wird im Gegensatz zur idealen Rundrille wesentlich stärker ovalisiert.

Bei der Erkennung der Ablegereife aufgrund äußerlich sichtbarer Drahtbrüche nach ISO 4309 [7] wird ein Vorhandensein innerer Drahtbrüche, ausgelöst durch die Ermüdung des Seiles durch Biegewechsel, vorausgesetzt. Die Anforderungen in [7] sind durch Biegeversuche

in der Mehrlagenwicklung



hinreichend abgesichert. In der Mehrlagenwicklung wird in der am häufigsten mehrlagig gespulten Seilzone die stärkste Drahtbruchentwicklung beobachtet. Ursache ist die extreme äußere mechanische Beanspruchung des Seiles, die jedoch auf Drahtbrüche im Seilinnern keine Rückschlüsse zulässt. Die Drahtbruchentwicklung in den ausschließlich durch gleich- oder gegensinnige Biegewechsel beanspruchten Seilabschnitten ist vernachlässigbar. Die Gültigkeit der nach [7] üblichen Ablegereifeerkennung anhand der Anzahl sichtbarer Drahtbrüche ist im Anwendungsgebiet der Mehrlagenwicklung deshalb fragwürdig und weiter zu untersuchen.

Durch Wahl der geeigneten Seilkonstruktion können Standzeit und Spulverhalten des Seils entscheidend beeinflusst werden. Für die Mehrlagenwicklung sind äußerst drehungsarme Spiralrundlitzenseile mit mehrlagigem Aufbau, litzen- oder seilverdichtet, jeder anderen Konstruktion

überlegen. Im Bereich der Windentrommel erlauben nur Hubwerkstrommeln mit Systemrillung in Kombination mit den dazu passenden Hubseilen einen idealen Betrieb der Mehrlagenwicklung. Bei genauer Auslegung kann auf den Einsatz zusätzlicher Spul- oder Seilführungsvorrichtungen verzichtet werden.

Experimentelle Untersuchungen und Auswertung

Dauerversuche und seilspezifische Gleichung

In einer ersten breit angelegten Versuchsreihe wurde eine Vielzahl von Lebensdaueruntersuchen auf einem eigens hierfür am IFT entwickelten und aufgebauten Großversuchsstand durchgeführt [1, 2]. Dabei wurde erstmals in diesem Umfang der Einfluss der Parameter „Seilzugkraft“, „Durchmesser Verhältnis Trommel- zu Seildurchmesser D/d “, „Seilvorspannung beim erstmaligen Bewickeln“ und „Lagenwech-

sel auf unterschiedlichen Trommellagen“ experimentell ermittelt. Dadurch war es möglich, den Einfluss der einzelnen Parameter auf die Lebensdauer zu quantifizieren. Durch systematische Auswertung konnten Gesetzmäßigkeiten bei der Variation der einzelnen Parameter erfasst und die Versuchsergebnisse mit entsprechenden Dauerbiegeversuchen in der Rundrille verglichen werden.

Teilweise erreichen Seile in der Mehrlagenwicklung je nach Parameterkombination nur noch 3 % der Lebensdauer, die im Dauerbiegeversuch auf der Rundrille erzielt wird. Als Ergebnis konnte durch Anwendung der linearen Mehrfachregression für jede der fünf untersuchten Hubseilkonstruktionen eine eigene seilspezifische Lebensdauergleichung formuliert werden (Bild 4).

Entscheidend ist, dass sich die einzelnen Seilkonstruktionen bei gleichen Parametern in der im Versuch erzielten Lebensdauer um bis zu Faktor 8 unterscheiden. Zur Unterscheidung der spezifischen Eigenschaften einzelner Seilkonstruktionen wurden deshalb in einer darauf aufbauenden zweiten Untersuchung [3] zusätzliche Seilparameter bewertet. Dadurch können die konstruktionsbedingten seilspezifischen Eigenschaften, die die Lebensdauerunterschiede maßgebend beeinflussen, in die Berechnung mit aufgenommen werden.

Parameter der Seilkonstruktion und allgemeine Lebensdauergleichung

Zur Beschreibung der konstruktiven Unterschiede, die entscheidenden Einfluss auf

die Lebensdauer der einzelnen Seilkonstruktionen in der Mehrlagenwicklung haben, wurden die folgenden Parameter eingeführt:

- ▶ Ovalisierungsquotient O_q und Querelastizitätsmodul E_{SQ}
- ▶ Arbeitsaufnahmevermögen der Seile in Querrichtung W_{SQ}
- ▶ Art der Seilverdichtung, Parameter x_v

Ovalisierungsquotient O_q und Querelastizitätsmodul E_{SQ}

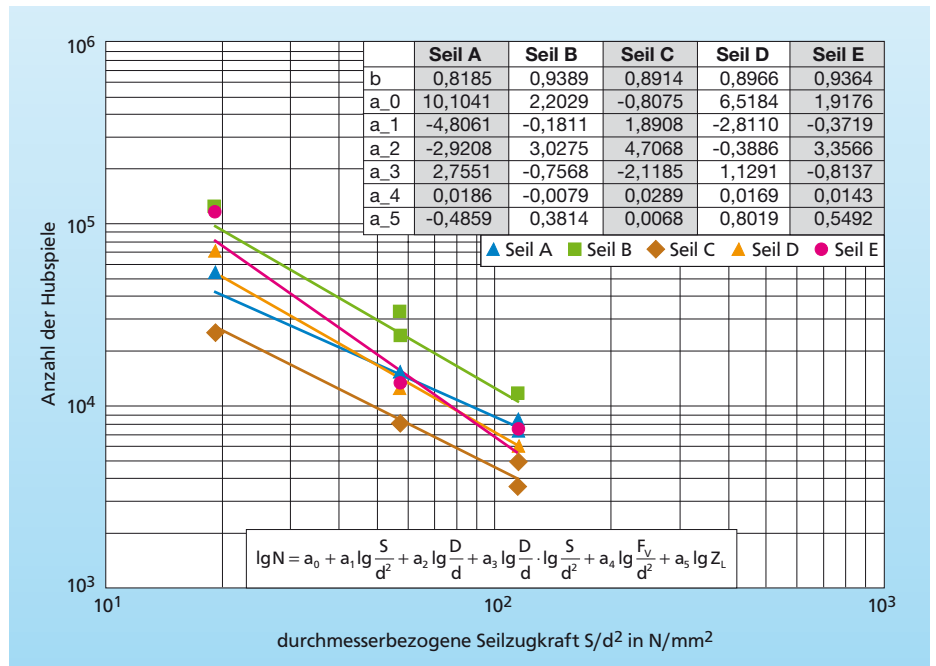
Für die Entstehung von Schäden durch die Mechanismen der Mehrlagenwicklung ist das Verhalten der Seile bei Querbeanspruchung wesentlich. In zwei Versuchsreihen wurden die Seile bei unterschiedlicher Längslast mit verschiedenen Querkräften beaufschlagt und die Querverformung gemessen. Aus den Verformungen des unbelasteten Seiles in x- und y-Richtung berechnet sich der Ovalisierungsquotient O_q . Aus den Messungen am belasteten Seil konnte der Querelastizitätsmodul E_{SQ} bestimmt werden, der in Abhängigkeit von der Seilzugbelastung veränderlich ist. Für jedes Seil lässt sich die Gleichung für die Kennlinie des Querelastizitätsmoduls ermitteln.

Besonders bei Litzenseilen ist die Größe des Seilelastizitätsmoduls in Längs- wie auch in Querrichtung von der Seilzugspannung abhängig und nicht konstant [9, 11]. Der mit der in [3] beschriebenen Methode ermittelte Querelastizitätsmodul soll vor allem dazu dienen, eine Vergleichsmöglichkeit zur Beschreibung der unterschiedlichen Seilkonstruktionen zu schaffen. Gleichzeitig wird angeregt, auch für zukünftige Vergleiche weiterer Seile auf diese Weise vorzugehen.

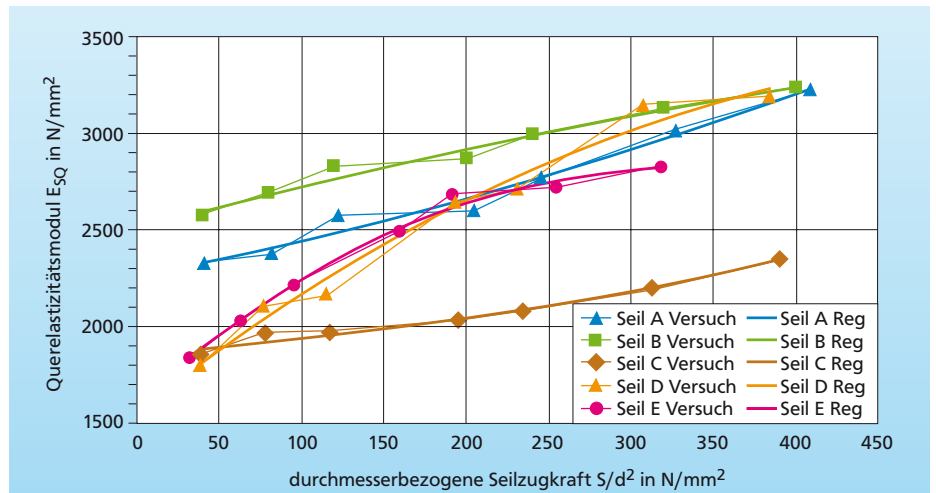
Ein Vergleich der Seilkonstruktionen zeigt bereits hier deutliche Unterschiede in den Verformungswerten auf (Bild 5). Querverformbarkeit und Querelastizität sind damit charakteristische Merkmale einer Seilkonstruktion.

Arbeitsaufnahmevermögen der Seile in Querrichtung W_{SQ}

Die Kennlinie beim Entlastungsvorgang der Querkraft verläuft unterhalb des Belastungsvorgangs [3, 9, 11, 12]. Hier stellt sich eine Hystereseffläche ein, deren Flächeninhalt im Kraft-Weg-Diagramm der von der Seilstruktur aufgenommenen Reibarbeit W_{SQ} entspricht (Bild 6). Damit kann aus den Messungen der Querelastizität ein weiterer, für eine Seilkonstruktion charakteristischer Parameter gewonnen werden.



4 Seilspezifische Regressionsgeraden für eine Parameterkombination ($D/d = 25$, $FV/d^2 = 19,16 \text{ N/mm}^2$, 2. auf 3. Lage)



5 Messwerte Querelastizitätsmodul E_{SQ} im Vergleich

Art der Seilverdichtung, Parameter x_v

Die Art der Seilverdichtung wird durch einen dimensionslosen Faktor x_v beschrieben:

- ▶ keine Verdichtung: $x_v = 0$
- ▶ Seil verdichtet: $x_v = 1$
- ▶ Außenlitzen verdichtet: $x_v = 2$
- ▶ Seil und Außenlitzen verdichtet: $x_v = 3$.

Zusammenfassung in der Lebensdauergleichung

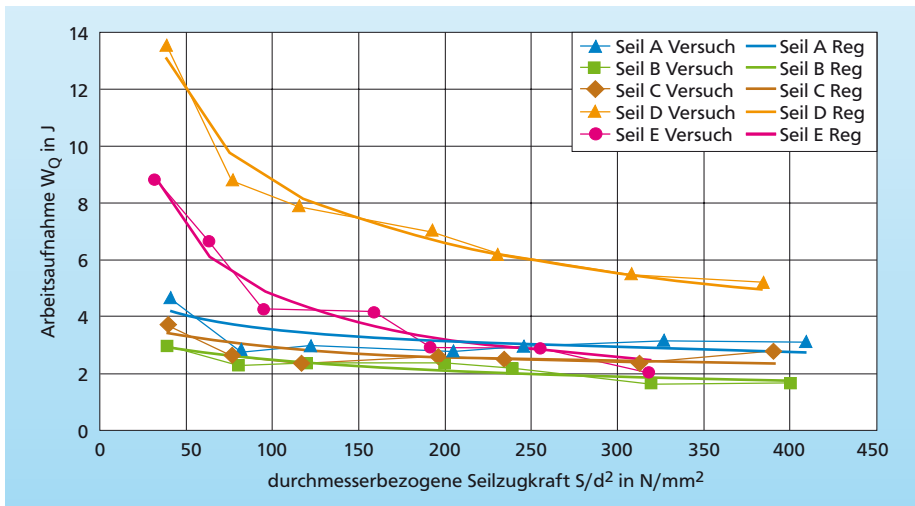
Damit liegen drei Parameter vor, mit deren Hilfe die spezifischen Eigenschaften der einzelnen Seilkonstruktionen sehr gut beschrieben werden können. Aufbauend auf den seilspezifischen Gleichungen ist daraus unter Berücksichtigung der geschaffenen Datenbasis mit Hilfe der Methode der Mehrfachregression eine allgemeingültige Gleichung zur Beschreibung der Seillebensdauer in der Mehrlagenwicklung ermittelt worden, mit der erstmals die Lebensdauer von Hubseilen in der Mehrlagenwicklung

mit hoher Sicherheit prognostiziert werden kann. Diese Gleichung zur Prognose der Lebensdauer von Seilen in der Mehrlagenwicklung lautet damit:

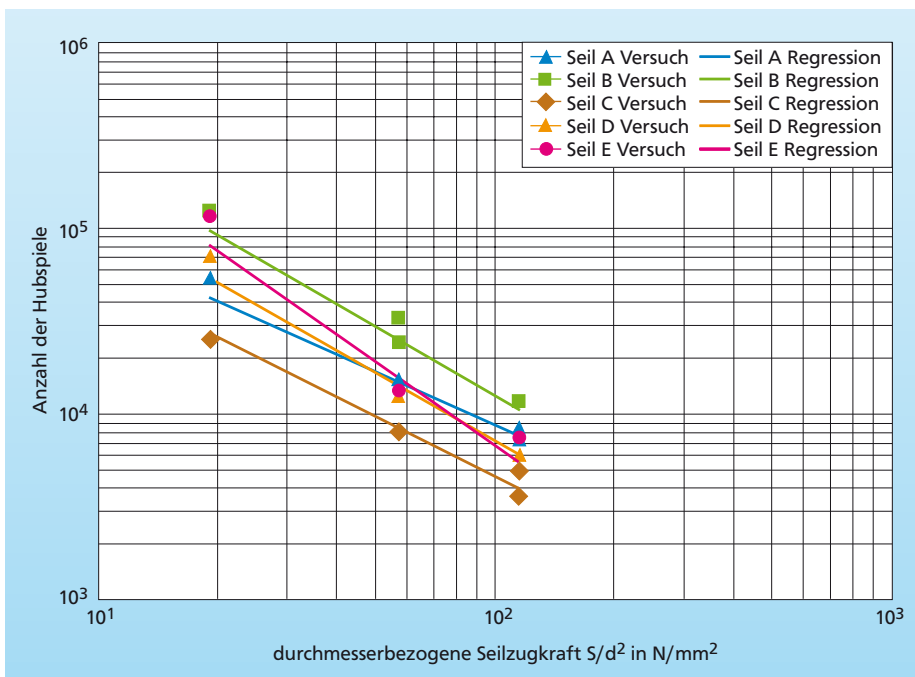
$$\begin{aligned} \lg N = & 6,2708 - 0,8875 \cdot \lg \frac{S}{d^2} + 2,1399 \cdot \lg \frac{D}{d} \\ & - 0,1252 \cdot \lg \frac{D}{d} \cdot \lg \frac{S}{d^2} \cdot \lg W_Q \cdot \lg E_{SQ} \\ & + 0,0143 \cdot \lg \frac{F_v}{d^2} + 0,2512 \cdot \lg Z_L - 0,0120 \cdot W_Q \\ & - 0,0006 \cdot E_{SQ} + 0,3413 \cdot x_v \\ & + 1,0481 \cdot \lg(O_{q,max} \cdot s_{Oq}) \end{aligned}$$

mit

- N Hubspielzahl bis zum Litzenbruch
- S/d^2 diameterbezogene Seilzugkraft in N/mm^2
- D/d Verhältnis Trommeldurchmesser D zu Seildurchmesser d
- W_Q Arbeitsaufnahmevermögen des Seiles unter Querbeanspruchung in J



6 Messwerte Arbeitsaufnahme W_Q



7 Darstellung der Regressionskurven für D/d = 25

- E_{SQ} Querelastizitätsmodul $E_{SQ}(5;25)$ des Seiles in N/mm^2
- F_V/d^2 diameterbezogene Vorspannkraft des Seiles beim erstmaligen Bewickeln der Trommel in N/mm^2
- Z_L maximal gewickelte Lagenzahl, z. B. bei Lagenwechsel 2. auf 3. Lage $Z_L = 2,5$
- x_V Faktor zur Berücksichtigung der Seilverdichtung
- $O_{q,max}$ Ovalisierungsquotient des Seiles in %
- s_{Oq} Standardabweichung des Ovalisierungsquotienten.

Die Güte der Annäherung der mit dieser Gleichung theoretisch ermittelten Geraden an die tatsächlichen Versuchsergebnisse zeigt exemplarisch der Vergleich im Diagramm (Bild 7). Die Ergebnisse der durchgeführten Untersuchungen bieten wesentliche Grundlagen für das Verständnis der zur Seilschädigung führenden Abläufe in der Mehrlagenwicklung.

Zusammenfassung und Ausblick

Mithilfe der allgemeinen Lebensdauergleichung für Seile in der Mehrlagenwicklung ist nun erstmals die Möglichkeit gegeben, auf der Grundlage seilspezifischer Parameter sowie der Betriebsdaten der Anlage mit hoher Genauigkeit eine Prognose über die Lebensdauer eines definierten Seiltyps in der Mehrlagenwicklung abzugeben. Dabei ist der Aufwand zur Ermittlung der seilspezifischen Parameter – in erster Linie eine Versuchsreihe zur Bestimmung des Seilverhaltens unter Querbeanspruchung – geringer anzusetzen als zur Durchführung von Dauerversuchen im Versuchsstand „Mehrlagenwicklung“. Dennoch ist die Durchführung weiterer Mehrlagenwicklungsversuche zur Erweiterung der Datenbasis und zur Erhöhung der Güte der Lebensdauergleichung unabdingbar. □

Literatur

- [1] Lebensdauer und Ablegereife bei Mehrlagenwicklung im Kranbau. Abschlussbericht des Forschungsprojektes. Schriftenreihe der Forschungsvereinigung Bau- und Baustoffmaschinen, Heft Nr. 28, Oktober 2004.
- [2] Weiskopf, U.; Wehking, K.-H.; Vogel, W.: Kranseile in der Mehrlagenwicklung. f+h, Mainz (2005)4, S. 184-187.
- [3] Weiskopf, U.: Untersuchung zur Lebensdauer von Kranhubseilen in der Mehrlagenwicklung. Universität Stuttgart, Dissertation 2007.
- [4] Feyrer, K.: Drahtseile – Bemessung, Betrieb, Sicherheit. 2., überarb. u. erw. Aufl. Berlin: Springer-Verlag 2000.
- [5] Briem, U.: Prüfstand-Untersuchungen. Seillebensdauer bei Mehrlagenspulung. Hebezeuge und Fördermittel, Berlin 42(2002)11, S. 566-567.
- [6] Verreet, R.: Wire rope damage due to bending fatigue and drum crushing. OIPEEC Bulletin 85, June 2003, S. 27 – 46.
- [7] Weiskopf, U.: Untersuchung zur Lebensdauer von Kranhubseilen in der Mehrlagenwicklung. Universität Stuttgart, Dissertation 2007.
- [8] Hoeland, G.: Ein Beitrag zur Berechnung von Seiltrommeln unter Berücksichtigung der Verformungen und der Reibung zwischen Seil und Trommel. f+h, Mainz 19(1969)6, S. 325 – 349
- [9] Dietz, P.: Ein Verfahren zur Berechnung ein- und mehrlagig bewickelter Seiltrommeln. TH Darmstadt, Dissertation 1971.
- [10] Neugebauer, H.-J.: Berechnungsverfahren für ein- und mehrlagig bewickelte Seiltrommeln mit und ohne Seilrillen. Hebezeuge und Fördermittel, Berlin 20(1980)1, S. 8-11; 5, S. 142 – 146.
- [11] Henschel, J.: Dimensionierung von Windentrommeln. TU Clausthal, Dissertation 1999. Veröffentlicht durch Studiengesellschaft Stahlanwendung e.V., Verlag und Vertriebsgesellschaft mbH, Düsseldorf, 2000.
- [12] Mupende, I.: Beanspruchungs- und Verformungsverhalten des Systems Trommel-mantel-Bordscheiben bei mehrlagig bewickelten Seiltrommeln unter elastischem und teilplastischem Werkstoffverhalten. TU Clausthal, Dissertation 2001. Göttingen: Cuvillier Verlag 2001.
- [13] Verreet, R.: Schulungsband Drahtseile. Aachen, 2000.

Dr.-Ing. Ulrich Weiskopf
ist Entwicklungsingenieur bei der Pfeifer Seil- und Hebeteknik GmbH in Memmingen



Prof. Dr.-Ing. Karl-Heinz Wehking
ist Leiter des Instituts für Fördertechnik und Logistik der Universität Stuttgart

