WIRE ROPE
TECHNOLOGY AACHEN

Über das Auftreten von Negativabdrücken

Über das Auftreten von Negativabdrücken

von Dipl.-Ing. Roland Verreet

Inhalt

1. Über das Auftreten von Negativabdrücken 4

2. Die Seilscheibe mit kleinen Drehwinkeln 5

3. Die Seilscheibe mit großen Drehwinkeln 6

4. Die geometrischen Voraussetzungen für das Eingraben 6

5. Erfolglose Maßnahmen zur Vermeidung von Eingrabungen 7

6. Mechanismen, die einem Eingraben entgegenwirken 8

7. Erfolgreiche Maßnahmen zur Vermeidung von Seileingrabungen 9

8. Was kann man tun, wenn bereits Eingrabungen in der Seilrille vorliegen? 11

9. Fallstudie: Eingrabungen in den Seilscheiben eines Regalbediengerätes 13

© 2005, 2016, 2018 Ingenieurbüro für Drahtseiltechnik Wire Rope Technology Aachen GmbH
Satz, Layout und Gestaltung: Benedikt Dolzer, Aachen
Nachdruck, auch teilweise, nur mit Genehmigung des Verfassers.

1. Über das Auftreten von Negativabdrücken der Seiloberfläche in den Rillen von Seilscheiben

Immer wieder findet man auf Kranen und anderen Seiltrieben Eingrabungen in den Rillen der Seilscheiben, die aussehen wie ein Negativabdruck des aufliegenden Drahtseiles (Abb. 1). Die Ursachen für das Auftreten derartiger Schäden sind noch nicht vollständig geklärt. Im Folgenden soll das Phänomen näher untersucht werden.

Abb. 1: Seilscheibe mit Eingrabungen

Ein Drahtseil liegt in einer begrenzten Zahl von Auflagepunkten mit den Kuppen seiner Außenlitzen auf einer Seilscheibe auf (Abb. 2). Da in diesen wenigen Punkten die Reaktionskräfte zu den im Drahtseil wirkenden Zugkräften übertragen werden, treten hier häufig relativ hohe Pressungen zwischen Drahtseil und Seilscheibe auf.

Diese hohen Pressungen, gepaart mit kleinsten Relativbewegungen zwischen Seil und Scheibe beim Auf- und Ablaufen des Drahtseiles, sind verantwortlich für den Materialabtrag auf der Scheiben und Seiloberfläche. In der Regel wird dieser Verschleiß aber sehr gleichmäßig auf dem Umfang der Seilscheibe verteilt stattfinden.
Damit sich ein Negativabdruck eines Drahtseiles ausbilden kann, müssen besondere Bedingungen vorliegen.

2. Die Seilscheibe mit kleinen Drehwinkeln

Betrachten wir zunächst eine Scheibe, die bei einem typischen Arbeitsspiel keine vollständige Umdrehung von 360° vollführt. Im Punkt P liegt zu Beginn des Arbeitsspiels eine Litzenkuppe auf der Seilrille auf (Abb. 2).

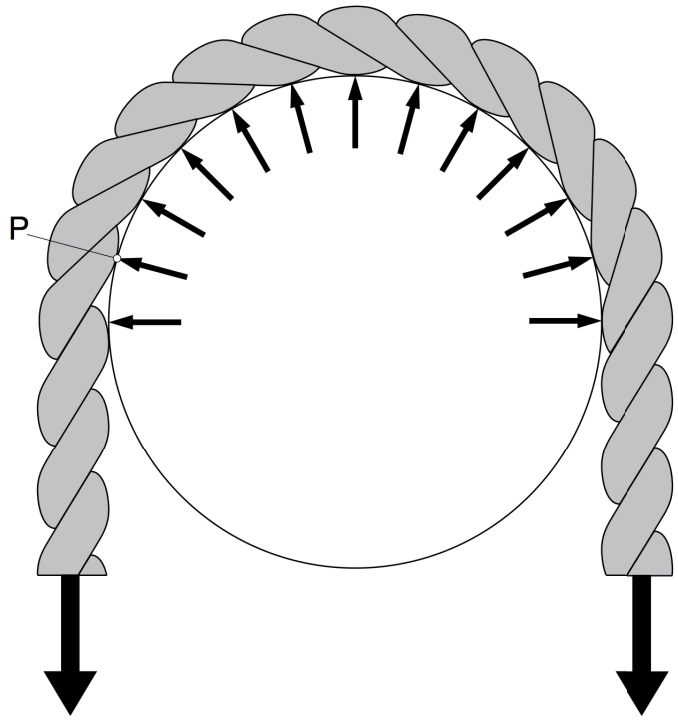

Abb. 2: Auflageverhältnisse

Wenn die Scheibe nun beispielsweise eine Drehung von 90° gegen den Uhrzeigersinn ausführt, wird die im Punkt P liegende Litzenkuppe den Rillengrund verlassen. Bei der Drehung der Scheibe zurück in die Ausgangsstellung wird sie wieder genau im Punkt P zu liegen kommen. Wenn nun die Scheibe immer wieder nur diese Bewegung vollführt, wird im Punkt P ein Materialabtrag stattfinden. Stellen in der Umgebung des Punktes P werden aber niemals Kontakt mit dem auf- und ablaufenden Drahtseil haben, so dass in der Umgebung des Punktes P die ursprüngliche Rillengeometrie erhalten bleiben wird. Das Resultat wird sein, daß sich das Drahtseil im Punkt P und den weiteren Auflagestellen in die Rille eingraben und einen Negativabdruck seiner eigenen Oberfläche herstellen wird.

Bei Seilscheiben, die nur sehr kleine Drehbewegungen vollführen, sind also immer die Voraussetzungen für ein Eingraben des Drahtseiles gegeben.

3. Die Seilscheibe mit großen Drehwinkeln

Nun ist der Fall einer sehr kleinen Drehbewegung einer Seilscheibe eher die Ausnahme. In der Regel laufen große Seillängen über die Seilscheibe, so daß diese bei einem typischen Arbeitsspiel eine Vielzahl von Umdrehungen vollführen wird. Betrachten wir nun die Verhältnisse für diesen Fall.

Im Punkt P liegt zu Beginn des Arbeitsspiels eine Litzenkuppe auf der Seilrille auf (Abb. 2). Wenn die Scheibe nun eine kleine Drehung ausführt, wird die im Punkt P liegende Litzenkuppe den Rillengrund verlassen. Nach einer Drehung der Scheibe von 180° wird sich das Drahtseil wieder mit einer anderen Litzenkuppe im Bereich von P in die Seilrille hineinlegen. Wahrscheinlich wird die im Bereich von P einlaufende Litzenkuppe aber nicht genau den Punkt P treffen, sondern beispielsweise eine Stelle 1mm neben P. Nach einer weiteren Drehung der Seilscheibe von 360° wird sich neue Auflagestelle noch einmal um 1mm von P entfernt haben. Auf diese Weise ist gewährleistet, daß sich beim Spulen einer größeren Seillänge die Auflagepunkte der Litzenkuppen auf der Oberfläche der Seilscheibe gleichmäßig verteilen, so daß sich auch der unvermeidliche Materialabtrag auf der Scheibe gleichmäßig über den Scheibenumfang verteilen wird.

Dennoch kann sich ein Drahtseil unter bestimmten Bedingungen auch dann in eine Seilscheibe eingraben, wenn die Scheibe bei einem typischen Arbeitsspiel eine Vielzahl von Umdrehungen vollführt.

4. Die geometrischen Voraussetzungen für das Eingraben

Die Zahl und der Abstand der Stützpunkte eines Drahtseiles auf einer Seilscheibe hängen ab von der Außenlitzenzahl, dem Effektivdurchmesser und der Schlaglänge des Drahtseiles.

Der Abstand zwischen den Litzenkuppen beträgt im geraden Zustand des Drahtseiles

$$A_{gerade} = L_0 / z$$

und im gebogenen Zustand

$$A_{gebogen} = L_0 \cdot D / (z \cdot (D + d)),$$

mit

L_0 = effektive Schlaglänge des Seiles,
z = Außenlitzenzahl,
D = Scheibendurchmesser im Rillengrund,
d = effektiver Seildurchmesser.

Die geometrischen Voraussetzungen für das Eingraben eines Drahtseiles in eine Seilscheibe sind genau dann gegeben, wenn der Punkt P nach jeder vollen Umdrehung der Scheibe wieder von einer Litzenkuppe getroffen wird. Dies ist genau dann der Fall, wenn der Umfang der Scheibe ein ganzzahliges Vielfaches des Abstandes der Litzenkuppen an der Seilunterseite des gebogenen Drahtseiles ist. In diesem Fall gilt folgende Gleichung:

$$U = n \bullet A_{gebogen}$$

oder

$$U = n \bullet L_0 \bullet D / (z \bullet (D + d)),$$

mit

$$n = \text{natürliche Zahl.}$$

Wenn der Scheibenumfang beispielsweise genau das 80fache dieses Litzenkuppenabstandes Agebogen ist (n=80), wird nach jeder vollen Umdrehung der Seilrolle der Punkt P wiederum exakt von einer Litzenkuppe getroffen werden, und zwar von der 80sten, 160sten, 240sten etc. Litzenkuppe des auflaufenden Seiles. Es wird also ein verstärkter Materialabtrag im Punkt P stattfinden, während die Umgebung von P in seinem ursprünglichen Zustand belassen wird. Wir erhalten also wieder ein Negativprofil des Drahtseiles in der Seilscheibe.

Wenn die Scheibe Drehungen über 360° vollführt, ist immer dann mit einem Eingraben des Seiles in die Rillenoberfläche zu rechnen, wenn der Umfang der Seilscheibe im Rillengrund ein Vielfaches des Litzenkuppenabstandes des gebogenen Drahtseiles ist.

5. Erfolglose Maßnahmen zur Vermeidung von Eingrabungen

Anhand der obigen Ausführungen könnte man nun verleitet sein, die Einflußgrößen so aufeinander abzustimmen, daß ein Eingraben nicht erfolgen kann. Man könnte beispielsweise den Scheibendurchmesser gezielt so wählen, daß der Scheibenumfang im Rillengrund um 3mm größer ist als ein ganzzahliges Vielfaches des Litzenkuppenabstandes. Bei dieser Scheibe wird sich zunächst der Auflaufpunkt der Litzenkuppe bei jeder Umdrehung um 3mm verschieben, so daß sich ein sehr gleichmäßiger Materialabtrag einstellen wird.

Infolge dieses Materialabtrags wird aber der Scheibendurchmesser im Laufe der Zeit kontinuierlich abnehmen. Eines Tages wird der Scheibendurchmesser um etwa

einen mm und demzufolge der Scheibenumfang um etwa 1 • π mm abgenommen haben. Nun tritt der Zustand ein, daß bei jeder Umdrehung immer wieder der Punkt P von einer Litzenkuppe getroffen wird. Der oben geschilderte Mechanismus wird also wieder einen verstärkten Materialabtrag im Punkt P erzeugen, während die Nachbarbereiche von P keiner Veränderung mehr unterworfen werden. So werden plötzlich Eingrabungen auftreten, obwohl vorher ein gleichmäßiger Verschleiß stattgefunden hat.

Auch könnte man versucht sein, den Seildurchmesser oder die Seilschlaglänge und damit die Litzenkuppenabstände so anzupassen, daß die geometrischen Voraussetzungen für ein Eingraben nicht gegeben sind. Ein Drahtseil verändert aber gerade zu Beginn seiner Einsatzzeit infolge von Setzeffekten seine Schlaglänge und seinen Effektivdurchmesser in nicht exakt vorherbestimmbarer Weise, so daß auch diese Maßnahmen keinen Erfolg haben werden.

Der Einsatz gehärteter Scheiben, die dem Materialabtrag besser widerstehen sollen, zeigt in der Praxis auch nicht immer den gewünschten Erfolg. Drahtseile werden aus Seildrähten sehr hoher Drahtfestigkeit hergestellt, die eine sehr hohe Härte aufweisen. Ein Seildraht mit einer Nennfestigkeit von 1960N/mm^2, ein heute durchaus üblicher Wert, hat eine Oberflächenhärte HB30 von über 5000N/mm^2. Derartige Werte werden selbst von gehärteten Seilscheiben nicht erreicht, so daß in dieser Paarung Seilscheibe/Seildraht der Draht immer der härtere Partner bleiben und sich der Materialabtrag bevorzugt auf der Scheibe abspielen wird. Erschwerend kommt hinzu, daß sich der Materialabtrag beim Seil eventuell auf einer sehr großen Länge verteilen wird, während er sich auf der Scheibe auf das kurze Stück des Scheibenumfangs konzentriert.

Auch die Verwendung besonders elastischer Scheibenwerkstoffe, die die Pressungen im Auflagepunkt durch eine bessere Anschmiegung der Scheibe an das Drahtseil herabsetzen sollen, zeigt in der Praxis nicht immer die gewünschte Wirkung. Bei Vorliegen der geometrischen Voraussetzungen gräbt sich ein Drahtseil genauso schnell in eine Kunststoffscheibe (Abb. 3 rechts) ein wie in eine gehärtete Stahlscheibe (Abb. 3 links).

Vereinzelt werden Gußstähle als Scheibenmaterial empfohlen, denen wegen ihres Graphitanteils Notlaufschmiereigenschaften zugesprochen werden.

6. Mechanismen, die einem Eingraben entgegenwirken

Aufgrund der bisherigen Ausführungen könnte man annehmen, daß ein Eingraben eines Drahtseiles in eine Seilscheibe praktisch unvermeidlich ist. Glücklicherweise gibt es aber auch Mechanismen, die der Ausbildung eines Negativprofiles des Drahtseiles in die Seilscheibe entgegenwirken.

So bewirkt beispielsweise ein leichtes Drehen des Drahtseiles während der Seilarbeit, daß trotz Erfüllung der oben genannten geometrischen Voraussetzungen kein Eingraben stattfindet. So würde beispielsweise bei jeder Überrollung der Punkt P durch eine Litzenkuppe getroffen. Diese Begegnung findet aber dennoch nicht statt, da das Seil nach einer Umdrehung der Scheibe eine leichte Drehung vollführt hat, so dass nun nicht wiederum eine Litzenkuppe den Punkt trifft, sondern das neben dieser Kuppe liegende Litzental.

Die Praxis zeigt immer wieder, daß Anlagen, die keinerlei Ablenkwinkel für die Drahtseile aufweisen, so daß diese keiner Verdrehung unterworfen werden, besonders anfällig für das Eingraben sind.

Ein zweiter Mechanismus, welcher der Entstehung von Eingrabungen entgegenwirkt, ist die kontinuierliche geringfügige Veränderung der Seilschlaglänge mit wechselnder Zugbeanspruchung des Drahtseiles. Diese Veränderungen sorgen für eine kontinuierliche geringfügige Verschiebung der Auflaufpunkte auf den Seilscheiben, was zu einem gleichmäßigen Materialabtrag führt.

Die Praxis zeigt, daß Seiltriebe mit nur geringen Lastwechseln oder Krane mit einem hohen Totlastanteil deutlich stärker zu Seileingrabungen neigen als Anlagen, deren Belastungsniveaus ständig wechseln.

7. Erfolgreiche Maßnahmen zur Vermeidung von Seileingrabungen

Der Materialabtrag auf der Seilscheibe tritt, wie bereits oben erwähnt, als Folge kleinster Relativbewegungen zwischen Drahtseil und Seilscheibe auf. Es liegt daher nahe, den Verschleiß durch den Einsatz geeigneter Schmiermittel herabzusetzen. Eine regelmäßige Nachschmierung von Drahtseilen während der Einsatzzeit wirkt der Ausbildung von Eingrabungen entgegen.

Eine Arbeit des Drahtseiles in stark abrasiver Umgebung, bei der beispielsweise immer wieder Staub- und Sandpartikel zwischen Drahtseil und Scheibe geraten, hätte den genau gegenteiligen Effekt.

Wie oben geschildert, verhindert eine leichte Seilverdrehung erfolgreich das Eingraben des Drahtseiles. Diesen Umstand kann man auch gezielt nutzen. Auf Anlagen mit relativ kleinen Ablenkwinkeln und hohen Totlasten, die wegen fehlender Seilverdrehung und ungenügender Schlaglängenveränderung verstärkt zu Eingrabungen neigen, kann ein Drahtseil eingesetzt werden, dessen Schlagrichtung entgegen den Regeln der Seiltechnik mit der Steigungsrichtung der Trommel übereinstimmt. So kann beispielsweise ein linksgängiges Seil für eine linksgeschnittene Trommel gewählt werden. Die „falsche“ Schlagrichtung führt zu einer (in diesem Fall gewünschten) Verdrehung des Drahtseiles durch die Trommel. In einem solchen Fall sollten allerdings wegen der Gefahr der Strukturveränderung bevorzugt strukturstabile Drahtseile, z. B. Drahtseile mit einer Kunststoffzwischenlage, verwendet werden.

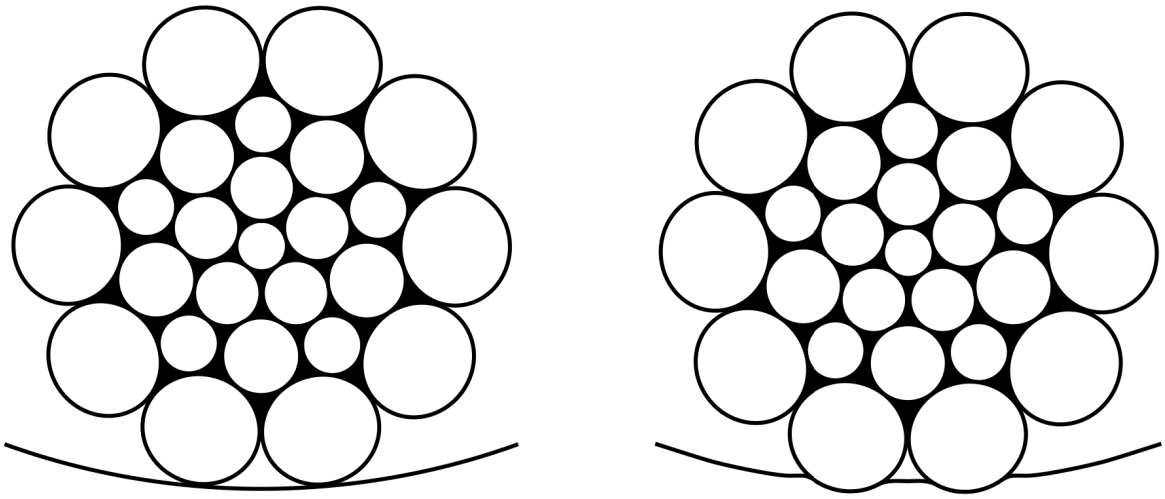

Abb. 3: Eingegrabene Scheibe mit passender Geometrie

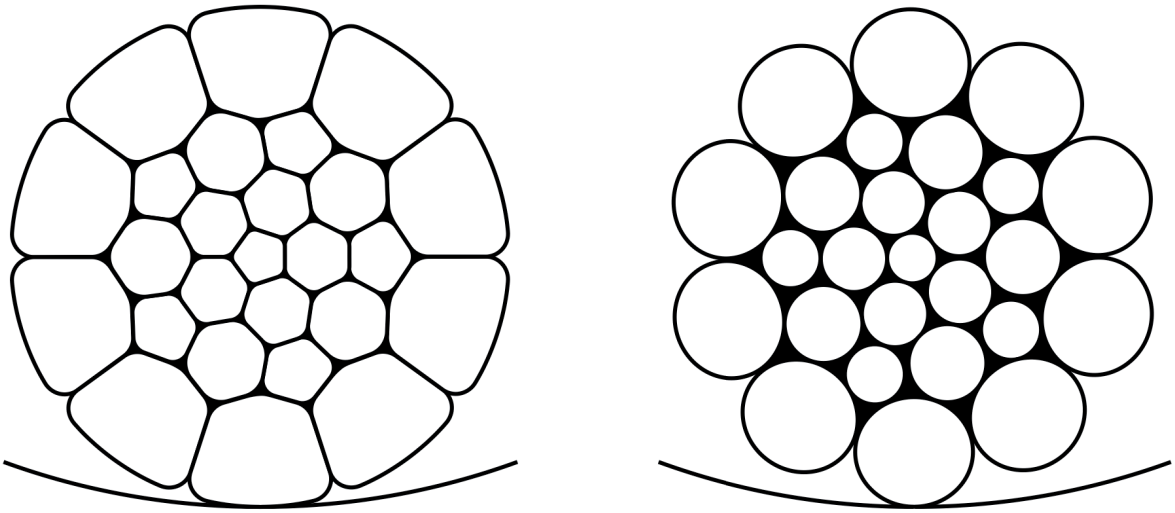

Abb. 4: Eingegrabene Scheibe mit ungünstigen Auflageverhältnissen

Ein besonders wirksames Mittel gegen das Auftreten von Eingrabungen in Seilscheiben ist der Einsatz von Drahtseilen mit verdichteten Außenlitzen. Die Außendrähte einer verdichteten Litze (Abb. 4 links) schmiegen sich erheblich besser an die Oberfläche der Seilrille an als die konventioneller Außenlitzen (Abb. 4 rechts). Hierdurch werden die Auflageflächen sehr stark vergrößert und infolgedessen die Pressungen und der Materialabtrag erheblich reduziert.

8. Was kann man tun, wenn bereits Eingrabungen in der Seilrille vorliegen?

Ein Drahtseil, welches sein eigenes Profil in den Rillengrund der Seilscheibe eingegraben hat, findet relativ günstige Auflageverhältnisse vor. Während es ursprünglich mit den Litzenkuppen nahezu punktförmig auf der Seilscheibe auflag (Abb. 2), wird nun jede Litzeüber eine größere Fläche unterstützt (Abb. 5). In dem von ihm selbst gegrabenen Bett ist das Drahtseil also zunächst gut aufgehoben.
Ein neu aufgelegtes Drahtseil findet allerdings auf einer eingegrabenen Seilscheibe äußerst ungünstige Auflageverhältnisse vor, da sein Durchmesser und seine Schlaglänge nicht mit dem vorgefundenen Profil übereinstimmen (Abb. 6). Es wird in seinen wenigen Auflagepunkten mit sehr hohen Pressungen beaufschlagt werden, die natürlich seine Aufliegezeit stark beeinträchtigen.

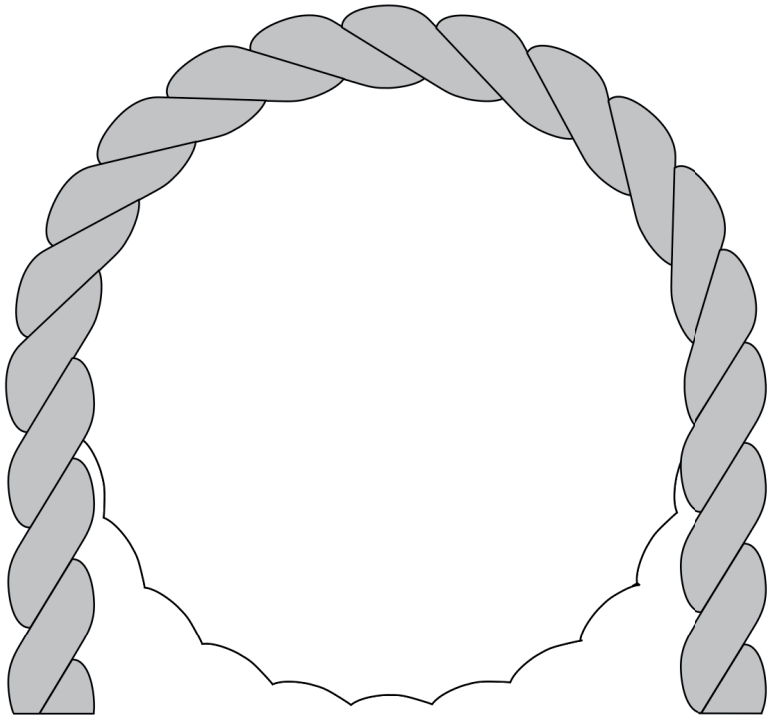

Abb. 5: Das Drahtseil, welches die Eingrabungen erzeugt, findet relativ günstige Auflageverhältnisse vor.

Auch wird das Seil versuchen, die Schlaglänge des eingegrabenen Profils anzunehmen und deshalb zu Strukturveränderungen, wie zum Beispiel zu einer Korbbildung, neigen. Deshalb sollte bei Vorliegen von starken Eingrabungen die Seilscheibe bei einem Seilwechsel ausgetauscht werden.

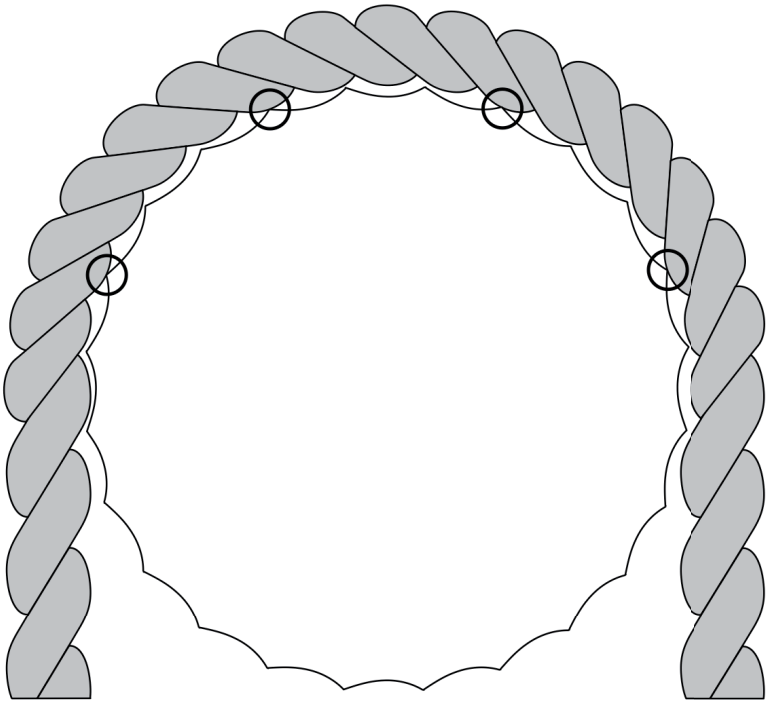

Abb. 6: Das neu aufgelegte Drahtseil passt in den meisten Fällen nicht in die Eingrabungen im Rillengrund.

Ein Austausch von Seilscheiben ist allerdings bei vielen Anlagen mit einem großen Aufwand verbunden. Daher sind viele Betreiber dazu übergegangen, bei Vorliegen von Eingrabungen ein Drahtseil mit einer Schlagrichtung aufzulegen, die den Eingrabungen entgegengesetzt ist. Auf eine Scheibe mit Eingrabungen eines rechtsgängigen Seiles würden sie beispielsweise ein linksgängiges Seil auflegen. Hier besteht dann weniger Gefahr, daß sich das neue Drahtseil in das alte Profil zu zwängen versucht. Auch wird das neue Drahtseil das alte Profil abzutragen versuchen.
Eine solche Maßnahme sollte aber mit dem Lieferanten des Drahtseiles abgesprochen werden. Wegen des zu erwartenden erhöhten, in diesem Fall aber gewünschten, Materialabtrags werden hier in der Regel Seile mit verdichteten Außenlitzen aufgelegt, die günstigere Auflageverhältnisse bieten, robuste Außendrähte besitzen und dem erhöhten Materialabtrag auch aufgrund ihres höheren Metallquerschnitts besser widerstehen können. Wegen der erhöhten Anforderungen an die Strukturstabilität werden auch hier vorzugsweise Drahtseile mit Kunststoffzwischenlage eingesetzt.

9. Fallstudie: Eingrabungen in den Seilscheiben eines Regalbediengerätes

Bereits wenige Tage nach der Inbetriebnahme eines der größten Regalbediengeräte der Welt reklamierte der Betreiber, daß sich die links- und rechtsgängigen Drahtseile vom Nenndurchmesser 40mm in die Seilscheiben eingegraben hatten.

Eine Untersuchung vor Ort und Gespräche mit dem Anlagenhersteller zeigten, daß auf dem Regalbediengerät alle Phänomene vorlagen, die das Eingraben von Drahtseilen begünstigen: Die Anlage besaß eine sehr hohe Totlast und eine vergleichsweise geringe Nutzlast. Die Seilschlaglänge veränderte sich daher im Betrieb nicht infolge von Laständerungen. Aufgrund der hohen Totlast und der Tatsache, daß die Außenlitzen der Drahtseile unverdichtet waren, waren außerdem die Pressungen zwischen Drahtseil und Seilscheiben relativ hoch.

Der Konstrukteur hatte zudem darauf geachtet, die Ablenkwinkel zwischen Drahtseil und Seilscheiben zu minimieren. An der ersten Seilscheibe betrug der Winkel nur etwa 1 Grad, an allen weiteren Seilscheiben lag überhaupt keine seitliche Seilablenkung vor. Das Fehlen von Ablenkwinkeln bewirkte hier, daß keine Seilverdrehung durch die Anlage stattfand, was ebenfalls das Auftreten von Eingrabungen begünstigte.

Wie konnte ein weiteres Eingraben verhindert und der bereits entstandene Schaden behoben werden? Eine Veränderung der Totlast oder der Nutzlast war nicht möglich. Auch ein Wechsel der Seilkonstruktion schien nicht sehr erfolgversprechend: Ein Drahtseil anderer Machart würde immer wieder in das bereits vorliegende Profil gezwängt und relativ schnell zerstört werden. Selbst ein Seil mit verdichteten Außenlitzen hätte einen schweren Stand.

Der Autor schlug daher vor, die Drahtseile zu tauschen. Die linksgängigen Drahtseile sollten auf den Seilscheiben laufen, in die sich bisher die rechtsgängigen Drahtseile eingegraben hatten, und umgekehrt. Zum einen würden die Seile mit der „falschen“ Schlagrichtung die Eingrabungen nicht verstärken. Zum anderen bestünde aber auch nicht die Gefahr, dass sie in die vorliegenden Profile hineingezwängt würden, sie würden diese vielmehr in kürzestster Zeit abtragen.

Unter Zugbelastung versucht ein Drahtseil, durch Vergrößerung der Seilschlaglänge (Aufdrehen) länger zu werden. Durch eine Wahl der Seilschlagrichtung entgegengesetzt zur Trommelgangrichtung wird bewirkt, daß die Seiltrommel diesem Mechanismus entgegenwirkt, indem diese das Drahtseil zudreht und verkürzt. Im vorliegenden Fall scheint dies aber so perfekt gelungen zu sein, daß überhaupt keine Veränderung der Seilschlaglänge mehr stattfand, was zu dem beobachteten schnellen Eingraben der Drahtseile führte.

Das Tauschen der Drahtseile sollte deshalb gezielt eine Seilverdrehung herbeiführen, die immer wieder durch Veränderung der Seilschlaglänge und durch dauernde Veränderung der Auflagepunkte auf der Seiltrommel und den Seilscheiben nach dem Abtrag der alten Profile ein erneutes Eingraben verhindert. Der Hersteller der Anlage zögerte: Das Tauschen der Seile war sehr aufwendig, und der Erfolg der Aktion schien ihm mehr als zweifelhaft. In Ermangelung einer besseren Alternative stimmte er jedoch schließlich zu.

In den ersten Tagen nach dem Tauschen war noch überall Nervosität zu spüren: Die Anlage lief zunächst sehr unruhig, weil die Seile ja nun auf einer rauhen Oberfläche spulten, die ihrem eigenen Profil entgegengesetzt war. Nach wenigen Tagen aber war das alte Profil abgetragen, und selbst nach 18 Monaten zeigte sich noch kein Anzeichen für die Ausbildung eines neuen, entgegengesetzten Profils. Auch die Drahtseile hatten die Aktion ohne Schaden überstanden.

Ingenieurbüro für Fördertechnik
Dipl.-Ing. Roland Verreet

Grünenthaler Str. 40a • 52072 Aachen
Tel.: 0241- 173147 • Fax: 0241- 12982
Mail: R.Verreet@t-online.de
www.seile.com