

Rechnergestützte Analyse von mehrfach eingesicherten Seiltrieben

Computer-aided rope drive analysis for multiple reeving systems

Martin Anders
Thomas Leonhardt
Thorsten Schmidt

*Professur für Technische Logistik
Institut für Technische Logistik und Arbeitssysteme
Fakultät Maschinenwesen
Technische Universität Dresden*

Die Bestimmung der Anzahl der Biegewechsel von laufenden Drahtseilen ist ein wesentlicher Bestandteil bei der Betriebsdaueranalyse von Seiltrieben. Auf Seilabschnitte, die während der Betriebszeit die meisten Biegewechsel erfahren, sollte bei einer Seilprüfung besonderes Augenmerk gelegt werden. Gerade bei mehrfacher Einsicherung ist jedoch nicht immer von vorn herein ersichtlich, um welche Seilabschnitte es sich dabei handelt. Auf der Basis der Geometrie des mehrfach eingesicherten Seiltriebs wird ein rechnergestütztes Analyseverfahren zur Ermittlung der Anzahl der Biegewechsel entlang des Drahtseils bei einem Arbeitsspiel vorgestellt.

[Schlüsselwörter: Drahtseil, Seiltrieb, Biegewechselanzahl, mehrfache Einsicherung, Hubwerk, Kran]

Determine the number of bending cycles is a basic step in the life time analysis of running wire rope systems. During a rope drive inspection particular attention should be paid to the rope sections which endured the most bending cycles during time of operation. Especially in multiple reeving systems these rope sections are not easily evident. On a geometrical basis of multiple reeving systems a computer-aided analysis tool is presented to determine the number of bending cycles along the wire rope during an operation cycle.

[Keywords: wire rope, rope drive, bending cycles, multiple reeving, hoist, crane]

1 AUSGANGSSITUATION

Das Drahtseil gehört zu den tragenden Elementen von Fördermaschinen und ist somit ein wesentlicher Bestandteil vieler Hebe- und Transportvorrichtungen. In Form eines laufenden Drahtseiles dient es vor allem bei Hebeeinrichtungen zum Bewegen von Lasten. Das Seil, an dem die Last angeschlagene ist, wird i. Allg. über meh-

rere Seiltriebelemente, wie Seilrollen, Seiltrommeln und Ausgleichsrollen geführt. Um die Seilkraft und das Antriebsmoment zu reduzieren, wird das Prinzip des Flachsenschzugs genutzt. Für das Erreichen höherer Übersetzungsverhältnisse kommt in den meisten Fällen die mehrfache Einsicherung des Drahtseils zwischen Rollenblöcken zum Einsatz. Am Kran ist diese mehrfache Einsicherung u. a. bei Hubwerken zwischen Ausleger und Hakenflasche oder bei Einziehwerken zwischen Haupt- und Gegenausleger (z. B. beim Derrickausleger) zu finden.

1.1 SEILTRIEBANALYSE

Laufende Drahtseile unterliegen beim Lauf über Seiltriebelemente der Ermüdung. Sie können bekanntermaßen nicht, wie andere Maschinenelemente, dauerhaft ausgelegt werden. Die Lebensdauer von laufenden Drahtseilen wird maßgeblich durch die Anzahl der bis zum Seilbruch ertragenen Biegewechsel bestimmt. Als Betriebsdauer ist die Anzahl der ertragenen Biegewechsel bis zur Ablegereife, dem Zeitpunkt, zu dem ein vorgeschriebener Grenzwert an äußerlich sichtbaren Drahtbrüchen erreicht ist, definiert. Die Betriebsdauer wird auch als Aufliegezeit bezeichnet [1]. Biegewechsel erfährt das Seil beim Lauf über Seiltrommeln und Seilrollen. Zur Definition des Begriffs Biegewechsel gelten die Bestimmungen aus DIN 15020-1 [2], wobei die dort verwendete Anzahl der Biegewechsel auf ein Arbeitsspiel – Heben und Senken – bezogen ist. Die hier verwendete Größe n_c (Anzahl der Einfachbiegwechsel) ist auf nur eine Hub- bzw. Senkbewegung bezogen, wodurch auch halbe Biegewechsel möglich sind.

Um einen sicheren Betrieb des Seiltriebs zu gewährleisten, muss die Ablegereife rechtzeitig erkannt werden. Bei Inspektionen wird das Seil deshalb regelmäßig auf Schäden untersucht. Schon bei Anlagen mit relativ kleinen Seillängen ist der zeitliche Aufwand für eine Inspektion des gesamten Seils durch Sichtprüfung mit Aufnahme der Drahtbrüche recht groß. Je länger das zu prüfende Seil

ist, desto größer der Aufwand. Die Anzahl der Biege-
 wechsel, die das Drahtseil beim Lauf über Seiltriebe-
 lemente erfährt, ist maßgebend für die entstehende Draht-
 bruchentwicklung. Daher ist es sinnvoll, den Seilabs-
 schnitt, der die größte Anzahl von Biegewechseln ertragen
 hat, zu ermitteln und diesen genauer zu inspizieren [3] [4].
 Mit der der sogenannten „Seilharfe“ [4] [5], einer Metho-
 de, die bei der Seiltriebanalyse für die Ermittlung der An-
 zahl der Biegewechsel über die gesamte Seillänge einge-
 setzt wird, kann dieser Seilabschnitt ermittelt werden.
 Dabei handelt es sich um ein graphisches Verfahren, bei
 dem die abgewickelte Seillänge, bestehend aus den Seil-
 abschnitten der Länge L_j zwischen den einzelnen Seiltrie-
 belementen (Seilrollen und Seiltrommeln), in Abhängig-
 keit vom Hubverhältnis h/H – aktueller Abstand h zum
 maximalen Abstand H der Seilrollenblöcke – dargestellt
 wird. Das Seil wird vom Festpunkt FP ausgehend abgewick-
 kelt und die Position der Seiltriebelemente wird entlang
 der Seillänge bei den Hubstellungen h_0 – minimaler Ab-
 stand – und H bestimmt. Dabei werden gerade und gek-
 rümmte Seilabschnitte unterschieden. Die Seillängen
 verhalten sich linear zu den Hubverhältnissen. Um alle
 Biegewechsel bestimmen zu können, werden die Seillän-
 gen beim Auflaufen und Ablaufen von einer Seilrolle oder
 Seiltrommel im Diagramm dargestellt. Zur Veranschauli-
 chung zeigt Abbildung 1 das Beispiel einer Seilführung
 eines Hubwerks mit 6facher Einscherung und einer Hub-
 höhe von 7,5 m. Die $k = 6$ Elemente zur Seilumlenkung
 (Seilrollen 1 bis 5 und Seiltrommel 6) sind von FP ausge-
 hend durchnummeriert. Bezugspunkt ist FP; er erhält den
 Index Null, d. h. die Bezeichnung P_0 . Das Seil läuft im
 Punkt P_{2i-1} auf das Seiltriebelement i und im Punkt P_{2i}
 von ihm ab – der Zählindex i läuft von 1 bis k , der Seiltrom-
 mel; einen Ablauf von der Seiltrommel gibt es nicht. Die
 so definierten Punkte erhalten den Index j , der von 1 bis
 $2k-1$ läuft. Ihnen werden die Seillängen L_j (Seillängen
 vom jeweiligen P_j bis zum Festpunkt P_0) zugeordnet.

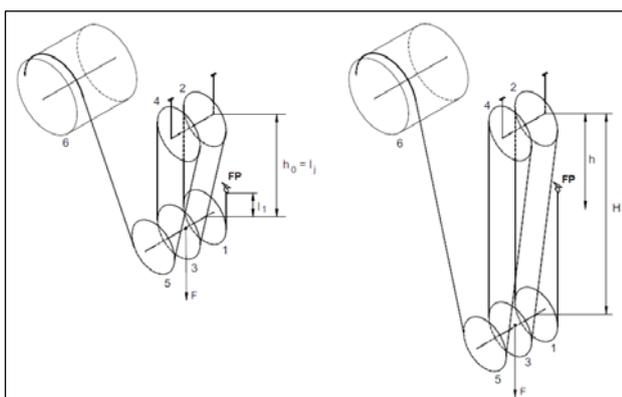


Abbildung 1. Beispiel eines Seilverlaufs eines Hubwerks

Mit Hilfe der Seilharfe ist es möglich, die Anzahl der
 auftretenden Biegewechsel je Hubbewegung, und damit
 für ein Arbeitsspiel, zu bestimmen. Zuerst werden dazu
 die Seillängen L_j als Funktion des Hubverhältnisses auf-
 getragen (Abbildung 2). Für jeden Punkt P_j erhält man ei-

ne steigende Gerade. Die zu gleichen Seiltriebelementen
 gehörenden Geraden sind parallel, je größer die Entfer-
 nung des Seiltriebelements von FP wird, desto größer
 wird der Anstieg. Der Seilbereich, der bei der Hubbeweg-
 ung einen halben Biegewechsel erfährt, beginnt bei der
 Seillänge des niedrigsten Hubverhältnisses und endet bei
 der Seillänge des höchsten Hubverhältnisses. Demzufolge
 sind Beginn und Ende des jeweiligen Biegewechselber-
 eichs bekannt. Zur Bestimmung der Anzahl der Biege-
 wechsel für ein bestimmten Hubverhältnisbereich wird die
 Abszisse auf diesen begrenzt. In den Anfangs- und End-
 punkten der geneigten Geraden werden horizontale Hilfs-
 linien eingezeichnet, die Anfang und Ende der Biege-
 wechselbereiche begrenzen und damit die graphische
 Ermittlung der Anzahl der Biegewechsel in den einzelnen
 Seilabschnitten ermöglichen. Im Beispiel (Abbildung 3)
 ist die Abszissenachse auf den Hubverhältnisbereich
 $h/H = 0,3$ bis $0,8$ begrenzt, in dem die Hubbewegung
 stattfindet. I. Allg. werden, wie beim gewählten Beispiel,
 Seilabschnitte von mehreren aufeinanderfolgenden Seil-
 rollen überrollt. Durch eine Summation der Biegewechsel
 in den einzelnen Seilabschnitten ergibt sich die Anzahl
 der Biegewechsel entlang des Seils, die als neue Abszisse
 über dem Diagramm aufgetragen wird. In Abbildung 3 ist
 die Anzahl der Biegewechsel für das Beispiel dargestellt.
 Der mit $n_c = 3,5$ Einfachbiegewechseln meistgebogene,
 und damit meistbeanspruchte Seilabschnitt liegt zwischen
 23.180 mm und 23.552 mm.

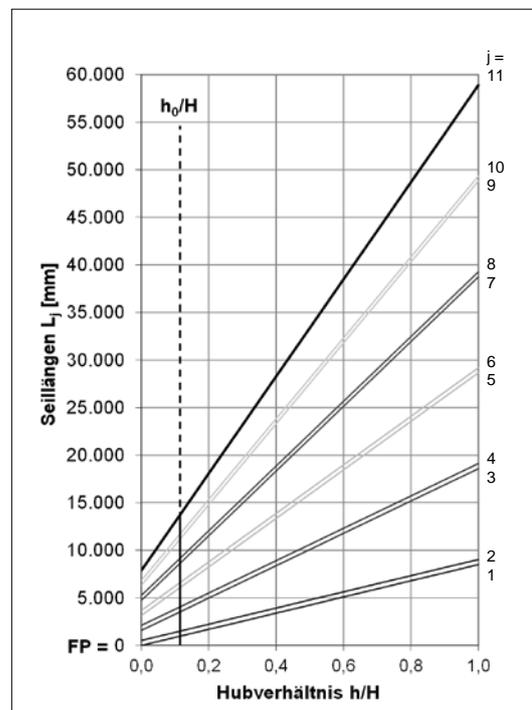


Abbildung 2. Seilabschnitte als Funktion des Hubverhältnis-
 ses für das Beispiel

Es ist möglich, die Umschlingungsbereiche an den
 Seilrollen zu vernachlässigen und die Doppelgeraden
 durch eine zu ersetzen. Damit würden in den jeweiligen

Seilabschnitten, bis auf den Seilabschnitt der Trommel, ganze Biegewechsel gezählt werden.

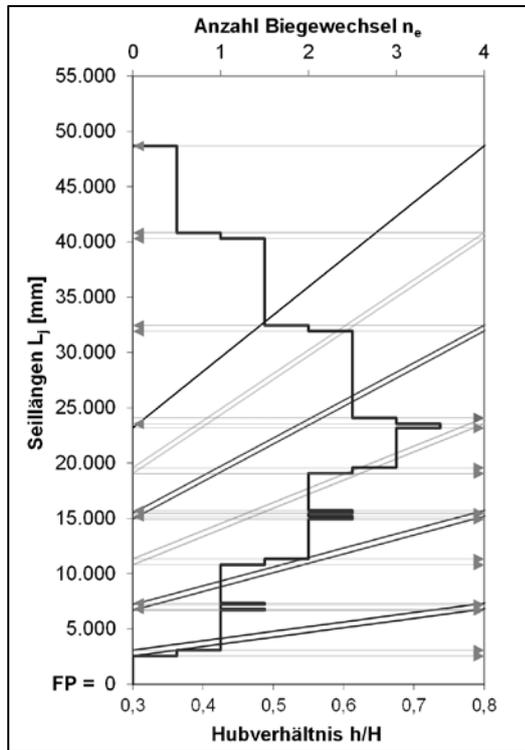


Abbildung 3. Anzahl n_e der Einfachbiegewechsel für das Beispiel

In vielen Anwendungen werden von Seiltrieben in Hubwerken o. ä. nicht immer die gleichen Hubhöhen mit gleichen Lasten angefahren, sondern je nach den Gegebenheiten ändern sich sowohl die angefahrte Hubhöhe als auch die Hublast. Hier liefert die beschriebene Analyse der Hubverhältnisse mit der Seilharfe grundsätzlich keine Aussage zum meistbeanspruchten Seilabschnitt. Für eine praxisnahe Ermittlung dieses Seilabschnitts ist es notwendig, dass die gefahrenen Lastkollektive in Verbindung mit den zugehörigen Hubverhältnissen in die Analyse einfließen. Je nach Anwendungsfall kann dies mit einem hohen Aufwand verbunden sein, insbesondere wenn Hublasten und Hubverhältnisse über die Betriebsdauer stark variieren und schwierig über die Laufzeit abgeschätzt werden können. Auf diese Problematik wird im Abschnitt 1.3 etwas näher eingegangen.

Wird aus der vorangegangenen Analyse der Hubverhältnisse ein meistbeanspruchter Seilabschnitt ermittelt, kann in praktischer Hinsicht für in Betrieb befindliche Anlagen eine gezielte Seilinspektion in diesem Abschnitt durchgeführt werden, um den Zustand des Seils unter Beachtung der Ablege Kriterien zu bewerten. Allerdings ist zu bemerken, dass auch andere kritische Bereiche des Seiltriebs nicht von der Inspektion ausgeschlossen werden dürfen. In theoretischer Hinsicht kann sich eine Betriebs- und Lebensdauerabschätzung des Seils bzw. des Seiltriebs

als Bestandteil der Seiltriebanalyse anschließen. Dies ist beispielsweise bei einer Neukonstruktion oder bei Veränderungen der Betriebsbedingungen vorteilhaft, um Inspektionsintervalle im Voraus festzulegen.

Die Lebensdauer laufender Drahtseile kann für verschiedene Seilkonstruktionen prinzipiell nach zwei Methoden abgeschätzt werden. Einmal mit der Methode nach Feyrer [6] oder mit der nach Jehmlich/Steinbach [4] [7] [8]. Beide Methoden werden in der aktuellen VDI 2358 [1] vorgestellt. Mit beiden kann die zu erwartenden Anzahl der ertragbaren Biegewechsel sowohl für die Betriebs- als auch für die Lebensdauer abgeschätzt werden.

1.2 EINFLUSSGRÖßEN AUF DIE ANZAHL DER BIEGEWECHSEL PRO ARBEITSSPIEL UND AUF DIE ABLEGEREIFE

Bereits durch die Konstruktion eines Seiltriebs wird die Anzahl der Biegewechsel je Arbeitsspiel festgelegt. In Anlehnung an [5] haben folgende Größen wesentlichen Einfluss auf die Anzahl der Biegewechsel je Arbeitsspiel:

- Anzahl loser und fester Seilrollen
- feste Achsabstände zwischen Seiltrommel und fester Seilrolle
- feste Achsabstände zwischen Festpunkt und Seilrolle bzw. zwischen festen Seilrollen untereinander
- veränderliche Achsabstände zwischen den Seilrollen im Flaschenzug

Diese konstruktiven Seiltriebeigenschaften werden in der Analysemethode Seilharfe berücksichtigt. Es ist zu beachten, dass Ausgleichrollen nicht in die Betrachtung einbezogen werden, da das Seil auf der Ausgleichrolle theoretisch nicht als laufendes Seil betrachtet wird, sondern nur statisch aufliegt und damit keine Biegewechsel erfährt. In der Praxis kommt es durch das Pendeln der Last oder durch Schwingungen im Seiltrieb zu kleinen Drehbewegungen der Ausgleichrolle. Diese dynamischen Bewegungen verursachen viele kleine Biegewechsel im Drahtseil, die weder in [2] noch mit der Seilharfe erfasst werden. Aus diesem Grund ist eine Kontrolle des Seilabschnitts im Bereich einer Ausgleichrolle im Rahmen der Seilinspektion immer Pflicht.

Neben den genannten Parametern werden u. a. in [1] weitere Einflussgrößen beschrieben, die im Wesentlichen die Biegewechselanzahl bis zur Ablegereife bzw. die Betriebs- und Lebensdauer beeinflussen. Hierbei wird zwischen Einflussgrößen unterschieden, „die von außen auf das Seil wirken“, und solche, „die im Seil selbst liegen, ihm schon bei der Herstellung mitgegeben werden und mit Ausnahme der Schmierung nachträglich nicht mehr verändert werden können“. Die wesentlichsten Einflussgrößen sind dabei die Seilzugkraft bzw. der Sicherheits-

faktor, das Verhältnis Seil- zu Seilrollendurchmesser, die Art der Seilkonstruktion sowie die Werkstoffeigenschaften der eingesetzten Drähte.

1.3 BERÜCKSICHTIGUNG REALER BETRIEBSDATEN ZUR ERMITTLUNG DES MEISTBEANSPRUCHTEN SEILABSCHNITTS

Die Ermittlung der Biegewechselanzahl nach dem in Abschnitt 1.1 vorgestellten Prinzip der Seilharfe beruht auf der Vorgabe eines minimalen und maximalen Hubverhältnisses, zwischen denen die Hubbewegungen statt-

finden. Die Hubbewegungen eines Seiltriebs finden in der Praxis nur selten zwischen zwei festen Hubverhältnissen statt, sondern es variieren die Hubhöhe und auch die Belastung. Für die Ermittlung des meistbeanspruchten Seilabschnitts ist es daher notwendig, die Lasten mit zugehörigen Hubwegen zu kennen bzw. im Betrieb zu erfassen. Es ergeben sich aus den verschiedenen Anwendungen die in Tabelle 1 zusammengefassten Möglichkeiten der Bewertung der Beanspruchung des Seils. Von Fall 1 zu Fall 4 steigt der Aufwand dafür, den meistbeanspruchten Seilabschnitt zu ermitteln.

Tabelle 1. Übersicht zur Ermittlung des meistbeanspruchten Seilabschnitts in Seiltrieben

Fall	Hubverhältnisse	Belastung (Seilkraft)	Vorgehen	Beispielanwendung
1	konstant	konstant	Seilharfe kann direkt angewendet werden	Schiffsentlader im Greiferbetrieb
2	konstant	variabel	Seilharfe kann direkt angewendet werden – zur Betriebs- und Lebensdauerabschätzung der Seile muss das Lastkollektiv berücksichtigt werden	Container-Schiffsentlader, Straddle Carrier
3	variabel	konstant	Erfassung und Klassierung der Hubverhältnisse – Seilharfe anwenden zur Ermittlung der Biegewechselverteilung längs des Seils	Radauslegerverstellung am Schaufelradbagger
4	variabel	variabel	Erfassung Hubverhältnissen und zugehörigen Seilbelastungen – Seilharfe, kombiniert mit klassierten Hubverhältnissen sowie höchsten und häufigsten Belastungen	Brückenkran, Portalkran, Mobilkran

Bei Anwendungen, die den Fällen 1 oder 2 entsprechen, ist eine Ermittlung des meistbeanspruchten Seilabschnitts einfach möglich, da feste Hubverhältnisse angefahren werden und der Seilabschnitt mit den meisten Biegewechseln definiert ist, auch bei verschiedenen Seilkräften pro Arbeitsspiel.

In den Fällen 3 und 4 müssen für eine sinnvolle Analyse mit der Seilharfe die Bewegungen in Verbindung mit den zugehörigen Belastungen ausgewertet werden. Diese sind entweder (systembedingt) bekannt oder müssen während des Betriebs fortlaufend erfasst werden. Im Fall 3 ist zur messtechnischen Ermittlung des zeitlichen Verlaufs der Hubbewegungen beispielsweise die Erfassung des (absoluten) Drehwinkels der Seiltrommel geeignet. Der gemessene Datensatz – Drehwinkel in Abhängigkeit von der Zeit – kann in einen „Hubverhältnisverlauf“ umgerechnet werden. Durch eine geeignete Klassierung des Verlaufs können die Häufigkeiten einzelner, vorher definierter Hubverhältnisbereiche ermittelt werden. In diesem Fall interessieren ihre untere und obere Grenze. Daher

sind zweiparametrische Klassierverfahren, z. B. die Spannen-Mittelwert-Zählung [9] oder die Rainflow-Zählung geeignet [10]. Unter Berücksichtigung der Verteilung der Hubverhältnisse kann die Seilharfe zur Ermittlung der Biegewechselverteilung längs des Seils angewendet werden.

Sind Bewegung und Belastung variabel (Fall 4), ist die Ermittlung des meistbeanspruchten Seilabschnitts mit sehr hohem Aufwand verbunden. Es ist zwar möglich, die Bewegung mit der zugehörigen Belastung zu erfassen und einzeln zu klassieren, jedoch geht durch die Klassierung der Bezug der Parameter untereinander verloren. So sind die Häufigkeiten verschiedener Lasthorizonte denen der Hubverhältnisse nicht zuzuordnen. In der Praxis tritt nicht zwangsläufig der häufigste Hubverhältnisbereich auch mit der größten Belastung auf. Somit kann eine Aussage zum meistbeanspruchten Seilabschnitt nur durch eine Auswertung eines jeden Seilabschnitts mit dem entsprechenden Belastungskollektiv getroffen werden. In diesem Fall ist es zu empfehlen, das Betriebsverhalten des jeweiligen

Seiltriebs abzuschätzen und ggf. eine Analyse mit der Seilharfe auf einen hinreichend großen Hubverhältnisbereich auszuweiten. Sicherlich spielt das Aufwand-Nutzen-Verhältnis aus wirtschaftlicher Sicht eine Rolle bei der Entscheidung, die meistbeanspruchten Seilabschnitte zu ermitteln. Ihre Kenntnis erleichtert in jedem Fall die Seilinspektionen.

2 UMSETZUNG DER SEILHARFE IN EXCEL

Für die automatisierte Ermittlung der Anzahl der Biegewechsel längs des Seils – nachfolgend Biegewechselaufteilung genannt – mittels der Methode Seilharfe wurde in Microsoft Excel unter Verwendung von Visual Basic for Application (VBA) ein Programm für mehrfach eingesicherte Seiltriebe entwickelt. Microsoft Excel ist das am weitesten verbreitete Tabellenkalkulationsprogramm. Mit seinem Funktionsumfang ist es sehr gut für die Umsetzung der Aufgabe geeignet. Im Folgenden wird ein Kurzüberblick über das angewendete Grundprinzip sowie über die bisher erreichte Funktionalität gegeben. Als Ausgangspunkt wurde eine von Steinbach [11] erstellte Excel-Kalkulation genutzt, mit der die Biegewechselaufteilung manuell ermittelt wird.

Die Seilharfe, eine graphische Darstellung (Abbildung 2), kann mathematisch durch Geradengleichungen beschrieben werden. Im erstellten Excel-Programm werden in einem Eingabeformular (Abbildung 4) die für die Biegewechselaufteilung relevanten Daten des Seiltriebs, wie z. B. Seiltrieblayout, minimales Hubverhältnis, Nennhubweg, eingetragen. Durch einen automatisierten Vergleich der einzelnen Seillängen pro Seilstrang werden in kleinen Hubverhältnis-Schrittweiten die Schnittpunkte der einzelnen, steigenden Geraden mit horizontalen Hilfslinien (Abbildung 3) ermittelt. Dies geschieht bisher graphisch, manuell. Beim Erreichen eines Schnittpunkts wird die Anzahl der Biegewechsel erhöht bzw. verringert. Als Resultat erhält man eine Biegewechselaufteilung für einen vorgegebenen Hubverhältnisbereich.

Mit der bisher erreichten Funktionalität können sowohl marktgängige Hubwerke als auch spezielle, mit zusätzlichen Seilrollen ausgestattete Seiltriebe sowie Abschnitte mit Gegenbiegung abgebildet werden.

Eingabebeispiel		Anzahl tragender Seilstränge: 6												
Seilkennwerte für den Seiltrieb		Kraft- und Sicherheitskennwerte im Seiltrieb				Hubwerkennwerte des Seiltriebes								
Seilbezeichnung	8 x 19S-IWRC	Nennhubkraft F_{11}	= 160 kN			Hubwerkstränge z_r	= 6							
Seilnenndurchmesser	$d = 11$ mm	Seilbruchkräfte F , Seilkräfte S , Sicherheitskennzahlen v				Nennhubweg H_N	= 8.600 mm							
metallischer Nennquerschnitt $C \cdot d^2$	$A = 57,6$ mm ²	Seilkräfte		$S_1 = 26,7$	$S^* = 14,1$ kN	Minimalabstand h_0	= 900 mm							
Nennfestigkeit	$R_m = 1.960$ N/mm ²	$F_{min} = 100$ kN	$v =$	$v^* =$	$v^* =$	Maximalabstand H	= 9.500 mm							
Rillensteigung DIN 15061 T2	$p = 13$ mm	$F_{e,min} = 113$ kN	$v =$	$v^* =$	$v^* =$	minimales Hubverhältnis h_0/H	= 0,095							
Verseilverlustfaktor k	= 0,89	$F_{e,m} = 100$ kN	$v =$	$v^* =$	$v^* =$									
Seilstrangzahlen														
Strang/Scheibe - Nr. j		1	2	3	4	5	6							
Name														
Scheiben-/Trommel [mm]	$\varnothing D =$	341	341	341	341	341	611							
Rillengrund [mm]	$\varnothing D_p =$	330	330	330	330	330	600							
Auflagewinkel [°]	$\alpha =$	180	180	180	180	180	360							
Auflagebogen [mm]	$U_a =$	536	536	536	536	536	1.920							
Stranglänge bei h_0/H [mm]	$l_j =$	450	900	900	900	900	900							
Strahlanstieg [mm]	$m =$	9.500	19.000	28.500	38.000	47.500	57.000							
Winkel zwischen Ebenen aufeinanderfolgender Seilscheiben [°]	$\epsilon =$	0	0	0	0	0	0							
Seiltrommel	Trommelspüllänge bei Nennhubweg H_N	$\Delta L = 51.600$ mm			Trommelwindungen: $W_{\Delta L} =$	$W_r =$	Windungsbreite $B_{WT} = 0$ mm							
Seillängen und Seilharfenstrahlen														
Hubverhältnis	$x=h/H$	Seillängen $y = L_j$ im Seiltrieb bei $x = h/H > 0$												
$y=b_j$ [mm]	0,00													
L_j zu $x=h_0/H$ [mm]	0,00	450	966	1.886	2.421	3.857	4.757	5.295	6.195	6.728	7.628			
L_j zu $x=0,2$ [mm]	0,20	1.450	1.986	3.886	4.421	6.321	6.857	8.757	9.293	11.193	11.728			
L_j zu $x=0,3$ [mm]	0,30	2.400	2.936	5.786	6.321	9.171	9.707	12.557	13.093	15.943	16.478			
L_j zu $x=0,4$ [mm]	0,40	3.350	3.886	7.686	8.221	12.021	12.557	16.357	16.893	20.693	21.228			
L_j zu $x=0,5$ [mm]	0,50	4.300	4.836	9.586	10.121	14.871	15.407	20.157	20.693	25.443	25.978			
L_j zu $x=0,6$ [mm]	0,60	5.250	5.786	11.486	12.021	17.721	18.257	23.957	24.493	30.193	30.728			
L_j zu $x=0,7$ [mm]	0,70	6.200	6.736	13.386	13.921	20.571	21.107	27.757	28.293	34.443	34.978			
L_j zu $x=0,8$ [mm]	0,80	7.150	7.686	15.286	15.821	23.421	23.957	31.557	32.093	39.693	40.228			
L_j zu $x=0,9$ [mm]	0,90	8.100	8.636	17.186	17.721	26.271	26.807	35.557	36.093	44.443	44.978			
L_j zu $x=H$ [mm]	1,00	9.050	9.586	19.086	19.621	29.121	29.657	39.157	39.693	49.193	49.728			
Seillänge im Einband / Verguß $L_E =$		mm						Sicherheitslänge auf der Windertrommel $L_r =$	mm		Gesamt- / Bestell- Seillänge $L =$		mm	
1. Vorbereitung des Formulars			2. Biegewechselverteilung erstellen			Inhalt der Tabellen löschen, um neue Eingabe zu starten								

Abbildung 4. Eingabeformular des Excel-Programms

3 ANWENDUNGSBEISPIEL SCHAUFELRADBAGGER SRS 6300

Als ein Beispiel für eine rechnergestützte Seiltrieb-
 analyse wird in diesem Abschnitt die Biegewechselauf-
 teilung der Radauslegerverstellung eines Schaufelrad-
 baggers ermittelt. Abbildung 5 zeigt den SRs 6300 im Tagebau
 Welzow-Süd. Kennt man die Biegewechselaufteilung, so
 ist es möglich, eine magnetinduktive Seilprüfung vor-
 zugsweise in den Seilabschnitten durchzuführen, die am
 höchsten beansprucht wurden.

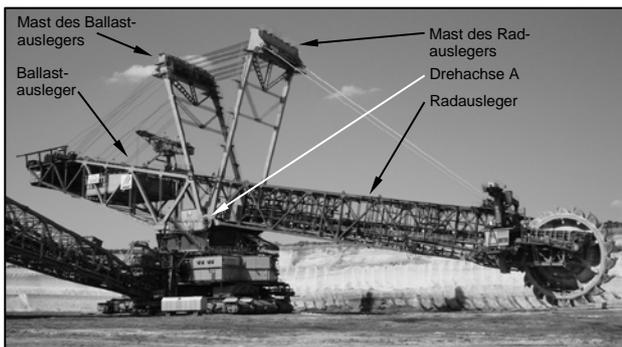


Abbildung 5. Schaufelradbagger SRS 6300 [12]

Der für die Höhenverstellung des Radauslegers ver-
 antwortliche Seiltrieb besteht aus vier parallel geschal-
 teten Flaschenzügen, deren Seile von Seiltrommeln auf-
 bzw. abgewickelt werden. Die Flaschenzüge befinden sich
 zwischen den Masten des Radauslegers und des Ballast-
 auslegers. Beide Masten sind starr mit ihren Auslegern
 verbunden. Der Ballastausleger ist starr, der Radausleger
 ist drehbar um eine horizontale Achse A gelagert. Wird
 der Flaschenzug verschoben, wippt der Radausleger um
 diese Achse.

Die Seile zwischen der Mastspitze und dem Ende des
 Radauslegers haben eine konstante Länge und gehören
 nicht zum Seiltrieb.

Jeder Seiltrieb besteht aus 19 Seilrollen – 9 sitzen auf
 der beweglichen Traverse am Mast des Radauslegers, 10
 auf der starren Traverse am Mast des Ballastauslegers –
 und einer Seiltrommel. Somit ergeben sich insgesamt 72
 tragende Seilstränge. Die Festpunkte des Seils und die
 Seiltrommeln befinden sich am Ballastausleger. In Abbil-
 dung 6 ist einer der Seiltriebe schematisch abgebildet.

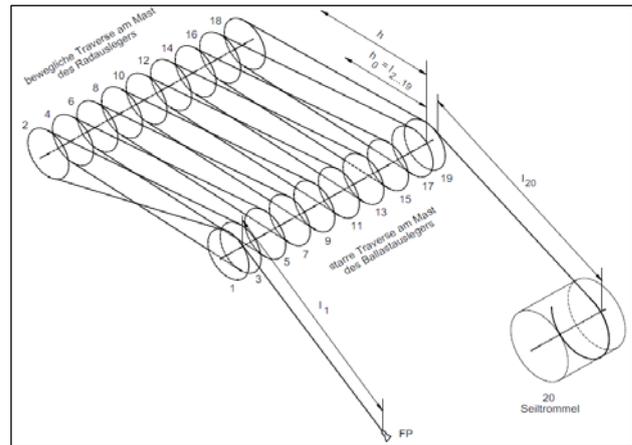


Abbildung 6. Seiltrieb des Auslegerverstellwerks – SRs 6300

Die Abstände zwischen den Seiltriebelementen, die
 Maße der Seilrollen bzw. der Seiltrommel und die seil-
 spezifischen Daten wurden nach [13] [14] zusam-
 mgestellt und in das Eingabeformular (Abbildung 4) ein-
 getragen. Für die Ermittlung der Biegewechselaufteilung
 werden die Hubverhältnisse benötigt, denen die Bewe-
 gungen der beweglichen Traverse zugeordnet werden
 können. Diese sind abhängig von der Arbeitshöhe des
 Schaufelrads. Abbildung 7 zeigt den möglichen Arbeits-
 bereich für die Höhenverstellung des Radauslegers. Bei
 minimalem Hubverhältnis befindet sich die Unterkante
 des Schaufelrads bei +40 m und bei maximalem Hubver-
 hältnis bei -15 m, von der Aufstandsfläche des Baggers
 aus gemessen. Im Folgenden wird exemplarisch eine Bie-
 gewechselaufteilung berechnet, bei der Annahme, dass
 Erdmaterial im Höhenbereich zwischen 0 und +20 m ab-
 getragen wird. Im Zahlenbeispiel liegt damit h/H im Be-
 reich von 0,43 bis 0,76. Die Biegewechselaufteilung ist in
 Abbildung 8 dargestellt. Demnach liegt der Seilabschnitt,
 der während einer Höhenverstellung mit acht Einfachbie-
 gewechseln die meisten Biegewechsel erfährt, zwischen
 ca. 339 und 350 m, inkl. eines Toleranzaufschlags von 2
 m, vom Festpunkt aus gemessen. Die für das Beispiel er-
 rechnete Biegewechselaufteilung mit den dazugehörigen
 Seilabschnitten gilt für alle vier Seiltriebe des Ausleger-
 verstellwerks des SRs 6300.

Um die real auftretenden, unterschiedlichen Hubver-
 hältnisbereiche zu erfassen, bietet sich das Vorgehen nach
 Abschnitt 1.3, Fall 3, an. Dazu müssen die (absoluten)
 Drehwinkel der Seiltrommeln während des Betriebs ge-
 messen werden. Die Klassierung der Messergebnisse lie-
 fert die Häufigkeitsverteilung der angefahrenen Hubver-
 hältnisse, woraus dann eine Biegewechselverteilung längs
 des Seils ermittelt werden kann.

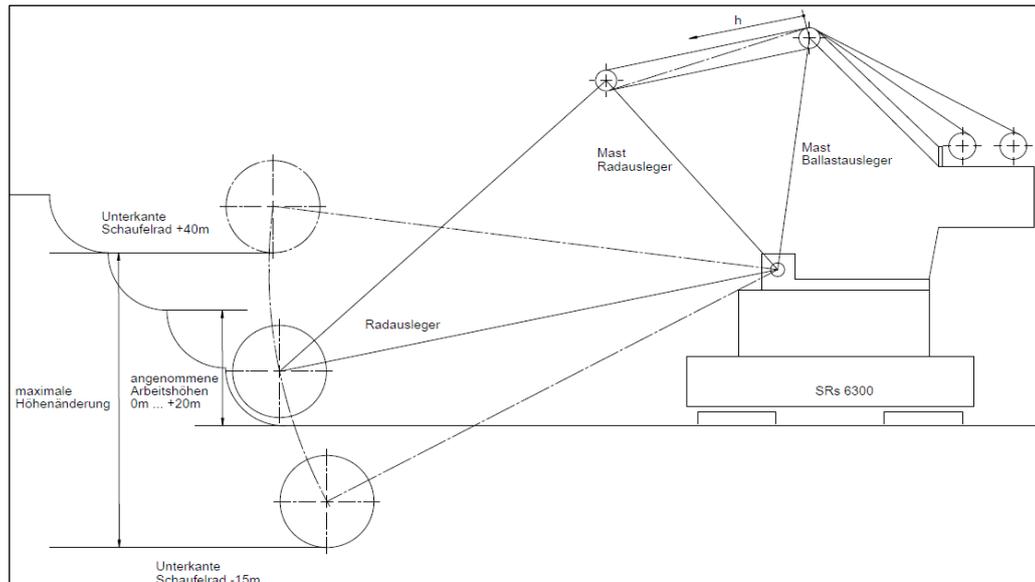


Abbildung 7. Vertikaler Arbeitsbereich des Radauslegers vom SRs 6300 nach [14]

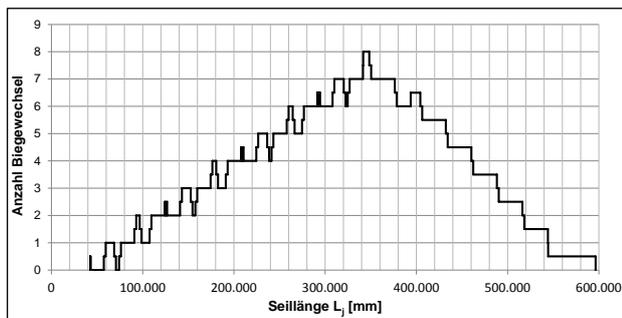


Abbildung 8. Biegewechselaufteilung der Radauslegerverstellung SRs 6300, h/H von 0,43 bis 0,76

4 ZUSAMMENFASSUNG

Mit dem vorgestellten Werkzeug zur Unterstützung der Seiltriebanalyse können Biegewechselaufteilungen entlang eines Drahtseils in Seiltrieben mit mehrfacher Einsicherung und unterschiedlichen Layouts durchgeführt werden. Mithilfe des Programms ist es möglich, den Seilbereich zu ermitteln, der die meisten Biegewechsel erfährt. In praktischer Hinsicht vereinfacht diese Kenntnis die Durchführung der vorgeschriebenen Seilinspektionen, weil der meistbeanspruchte Seilabschnitt vorher bekannt ist und die Kontrolle des Seils besonders auf diesen lokalisiert werden kann. Diese Vorgehensweise ist vor allem bei Anlagen mit langen Seilen effektiv und effizient, da sonst das gesamte Seil im Detail untersucht werden müsste. In theoretischer Hinsicht bildet sie den Ausgangspunkt für die Abschätzung der Betriebsdauer. Das entwickelte Programm kann darüber hinaus bei der Auslegung von mehrfach eingesicherten Seiltrieben eingesetzt werden, um die Biegewechselaufteilung längs des Seils bereits in der Entwurfsphase zu analysieren. Es können unterschiedliche Seiltriebvarianten untersucht werden, um eine für die je-

weilige Arbeitsaufgabe günstigen Biegewechselaufteilung und somit eine Erhöhung der Betriebsdauer zu erreichen. Zusätzlich können in den Excel-Formularen Kennwerte des eingesetzten Drahtseils und Messdaten, wie Drehwinkel der Seiltrommel und Seilkräfte im Seiltrieb, übersichtlich hinterlegt werden. Über geeignete Schnittstellen können weiterführende Berechnungsprogramme, wie z. B. eine Betriebs- und Lebensdauerabschätzung für den jeweiligen Seiltrieb nach [6] oder [7], zugreifen.

Da die Seiltriebanalyse mit der weit verbreiteten Tabellenkalkulationssoftware Excel umgesetzt wurde, ist ein breiter und unkomplizierter Einsatz möglich. Bei der Implementierung des Algorithmus wurden aktuelle Normen und Richtlinien beachtet. Durch verschiedene Möglichkeiten der Voreinstellung wird die Eingabe vereinfacht, es können aber auch kompliziertere Seiltriebe untersucht werden. Voraussetzung für die Ermittlung der korrekten Biegewechselaufteilung längs des Seils von in Betrieb befindlichen Anlagen ist die Kenntnis und Aufbereitung von Betriebsdaten.

Das erarbeitete Werkzeug nutzt die Arbeitsgruppe Materialflusstechnik der Professur für Technische Logistik für Seiltriebanalysen und Lebensdauerabschätzungen, die von interessierten Herstellern und Betreibern für technischer Anlagen in Auftrag gegeben werden.

LITERATUR

- [1] VDI 2358: Drahtseile für Fördermittel. 2012
- [2] DIN 15020-1: Hebezeuge - Grundsätze für Seiltriebe - Blatt 1 Berechnung und Ausführung. 1974

- [3] Briem, U.: Verbesserung der Ablegereifeerkennung laufender Drahtseile durch Kombination von Ablegekriterien. Stuttgart: Univ., Dissertation, 1996
- [4] Steinbach, G.; Gronau, O.; Ryk, D.: Drahtseile in Seiltrieben-Betriebsdauer, Schädigung und Inspektion. In: 17. Kranfachtagung, Krane – wirtschaftliche Aspekte und Entwicklungstendenzen. Dresden, 2009
- [5] John, W.: Ermittlung von Biegewechselzahlen je Arbeitsspiel an Seiltrieben der Hebezeuge. Hebezeuge und Fördermittel, Berlin 28 (1988), S. 127-128
- [6] Feyrer, K.: Drahtseile: Bemessung, Betrieb, Sicherheit. Berlin; Heidelberg: Springer, 2000
- [7] Jehmlich, G.: Anwendung und Überwachung von Drahtseilen. Berlin: Verl. Technik, 1985
- [8] TGL 34022/03: Fördertechnik - Seiltriebe - Berechnung. 1980
- [9] DIN 45667: Klassierverfahren für das Erfassen regelloser Schwingungen. 1969
- [10] Köhler, M.; Jenne, S.; Pötter, K.; Zenner, H.: Zählverfahren und Lastannahme in der Betriebsfestigkeit. Berlin; Heidelberg: Springer, 2012
- [11] Steinbach, G.: SRs_6300_Harfe_z_18.xls – Excel-Dokument. Verein für Technische Sicherheit und Umweltschutz TSU e. V., 2009
- [12] <http://tiger-rag.com/blog/2008/05/29/tagebauwelzow-sud-und-relikte-von-brikettfa-briken-im-raum-senftenberg/>, 20.05.2008 [letzter Zugriff am 31.01. 2014]
- [13] Steinbach, G.; Ryk, D.: Fachseminar - Vattenfall Europe Mining AG Schwarze Pumpe - Tagebaugeräte - Aktuelle sicherheitliche Aspekte Tragwerke und Drahtseile. Verein für Technische Sicherheit und Umweltschutz e. V. in Verbindung mit DMT GmbH- Bergbauservice. Schwarze Pumpe, 15.01.2008
- [14] Krüger, J.; Hasse, N.; Gräwe, E.: Taschenbuch Tagebaugroßgeräte, nach Zeichnungs-Nr. 010351468 des VEB Lauchhammerwerks. Berlin: VEB Wärmeanlagenbau, 1985

Dipl.-Ing. Martin Anders, Research Assistant at the Chair of Logistics Engineering, Institute of Material Handling and Industrial Engineering, Technische Universität Dresden.

Martin Anders is research assistant at the Chair of Logistics Engineering and researches especially in the field of running wire ropes, its lifetime calculations and forecasts. He studied mechanical engineering between 2002 and 2009. After an internship at the Kirow Leipzig KE Kranbau Eberswalde AG he wrote at the Chair of Logistics Engineering his diploma thesis with the topic “Design and development of multiple-grooved magnetic traction sheaves”. Furthermore, Martin Anders has been contributing in the TSU e. V. (Association for Technical Safety and Environmental Protection) in the working group of supporting structures for dynamic loads.

Address: Technische Universität Dresden, Faculty of Mechanical Science and Engineering, Institute of Material Handling and Industrial Engineering, Chair of Logistics Engineering, 01062 Dresden, Germany.
Phone: +49 351 463 39207
Fax: +49 351 463 35499
E-Mail: martin.anders@tu-dresden.de

Dr.-Ing. Thomas Leonhardt, Research Assistant at the Chair of Logistics Engineering, Institute of Material Handling and Industrial Engineering, Technische Universität Dresden.

Thomas Leonhardt is research assistant at the chair of logistics engineering since 1991. After achieving his diploma degree in mechanical engineering in the field of material handling in 1983 he was research assistant at the TU Dresden. Between 1987 and 1991 he was R&D Engineer at TAKRAF IFF GmbH in Leipzig. In 1989 he did his doctor's degree with the topic “Automated target approach of double jib level luffing cranes in kangaroo operation mode.” His current research areas are the design and dimensioning of machinery components for material handling systems, multi-body simulations, system analyses especially for cranes and conveying machines and new solutions for industrial trucks.

Address: Technische Universität Dresden, Faculty of Mechanical Science and Engineering, Institute of Material Handling and Industrial Engineering, Chair of Logistics Engineering, 01062 Dresden, Germany.
Phone: +49 351 463 32543
Fax: +49 351 463 35499
E-Mail: thomas.leonhardt@tu-dresden.de

Prof. Dr.-Ing. habil. Thorsten Schmidt, Head of the Chair of Logistics Engineering, Director of the Institute of Material Handling and Industrial Engineering, Technische Universität Dresden

Thorsten Schmidt is full professor at the TU Dresden and heads the Chair of Logistics Engineering in the Mechanical Engineering faculty since 2008. He holds a diploma degree in mechanical engineering from the TU Dortmund and a Master degree in industrial engineering from the Georgia Institute of Technology. He received his Ph.D.

from the TU Dortmund in 2001. His research areas are the design and optimization of facility logistics and production systems including a focus on the machinery and components involved. He currently works on energy efficient control strategies in material flow, fast approximation in early planning stages by means of standard design modules, online data analysis, formal verification of control logic, performance analysis of decentral and selfcontrolled systems, lightweight structures in material handling and stress analysis on wire ropes and toothed belts, respectively.

Address: Technische Universität Dresden, Faculty of Mechanical Science and Engineering, Institute of Material Handling and Industrial Engineering, Chair of Logistics Engineering, 01062 Dresden, Germany.

Phone: +49 351 463 32538

Fax: +49 351 463 35499

E-Mail: thorsten.schmidt@tu-dresden.de