

Seilkraftregelnde Hubwerke: Steigerung der Betriebs- und Lebensdauer von Drahtseilen in Mehrlagenwicklung

Tension Control Hoists: Increasing lifetime and service life of wire rope under multi-layer spooling

**Raimond Hofmann
Thorsten Schmidt**

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

In Mobil-, Raupen- und Turmdrehkränen kommen häufig mehrlagig wickelnde Trommelwinden zum Einsatz. Für die eingesetzten Drahtseile geht dies mit einer deutlich geringeren Betriebsdauer einher und führt zu Mehrkosten. Wechselnde Hublasten beim Auf- und Abwickeln der Seiltrommel bilden sich inhomogene Spannungszustände aus, die zu lokalen Spannungsspitzen und Relativbewegungen im Wickelpaket führen. Das in diesem Artikel vorgestellte seilkraftregelnde Hubwerk reduziert die schädigende Wirkung der Mehrlagenwicklung, indem eine zusätzlich in Drehmoment-Drehzahl-Regelung vorgeschaltete Treibscheibe die Hublast von der Seilvorspannkraft im Wickelpaket entkoppelt. Eine Reihe von Dauerspulversuchen zeigt eine durchschnittliche Steigerung der Betriebs- und Lebensdauer um 85% bzw. 39%.

[Schlüsselwörter: Drahtseil, Trommelwinde, Mehrlagenwicklung, Ermüdungsverhalten, Experimentelle Analyse]

Mobile, crawler and tower cranes commonly utilise multi-layer spooling drum winches. This amounts to drastically reduced wire rope service life. During operation, changing loads result in an uneven pressure distribution inside the spooling package. This allows local peaks in pressure and relative movement between rope layers, both of which cause higher wear. In this article, we present a novel tension control hoist that reduces negative influence from multi-layer spooling by eliminating variations in rope tension on the spooling package. An additional traction sheave that runs in conjunction with the drum through a torque-drive-control disconnects the working load from the rope tension on the drum. Spooling experiments show an increase in service life and lifetime of 85% and 39%.

[Keywords: wire rope, drum winch, multi-layer spooling, fatigue, experimental analysis]

1 ERHÖHTER VERSCHLEISS BEI MEHRLAGIGER WICKLUNG

In Mobil-, Raupen und Turmdrehkränen finden mehrlagig wickelnde Trommelwinden weite Verbreitung, da so auf geringem Raum große Seillängen gespeichert werden können. Dies geht jedoch mit einer signifikant größeren Beanspruchung der eingesetzten Drahtseile einher. Deren Lebensdauer reduziert sich auf bis zu 3 bis 10%, wenn diese auf mehrlagig statt einlagig bewickelten Seiltrommeln verwendet werden [Weiskopf 2008]. In der Praxis wird das Drahtseil infolge variierender Hublasten mit schwankender Vorspannkraft auf die Seiltrommel aufgewickelt, wodurch sich im Wickelpaket ein inhomogenes Spannungsgefüge ausbildet (Abbildung 1). Lokale Spannungsspitzen führen zu einer erhöhten Beanspruchung des Drahtseils, wodurch dessen Betriebs- und Lebensdauer sinken. Dies bedingt den häufigeren Austausch des Drahtseils, wodurch zusätzliche Betriebskosten entstehen.

Die Seilvorspannkraft, mit der das Drahtseil auf die Seiltrommel aufgewickelt wird, beeinflusst dessen Lebensdauer in Mehrlagenanwendungen signifikant. [Weiskopf 2008] bestimmt diesen Einfluss auf 20-30%. Grund dafür sind verschiedene Effekte. [Dietz 1971] und [Henschel 2000] zeigen, dass die Querkontraktion des Drahtseils infolge einer einwirkenden Zugkraft dessen Querelastizität verringert und stellen fest, dass die unteren Lagen mehrlagiger Wickelpakete entlastet werden. Durch den zunehmenden Druck des Wickelpakets verformt sich die Seiltrommel elastisch und ermöglicht eine Verringerung des Seildurchmessers, die zur Entspannung der unteren Seillagen führt. [Weiskopf 2008] weist ebenfalls nach, dass sich untere Lagen mit zunehmender Anzahl an Hubspielen entspannen, wenn sie nicht regelmäßig von der Trommel abgewickelt werden. Es lässt sich also sagen, dass die Querelastizität der unteren Lagen eines mehrlagigen Wickelpakets größer ist als die der höheren Lagen und im Betrieb weiter steigen kann. Eine hohe Querelastizität

wirkt sich jedoch negativ auf die Widerstandsfähigkeit gegen die beobachtete Schädigung durch Pressung und Ovalisierung des Drahtseils in Querrichtung aus [Weiskopf 2008].

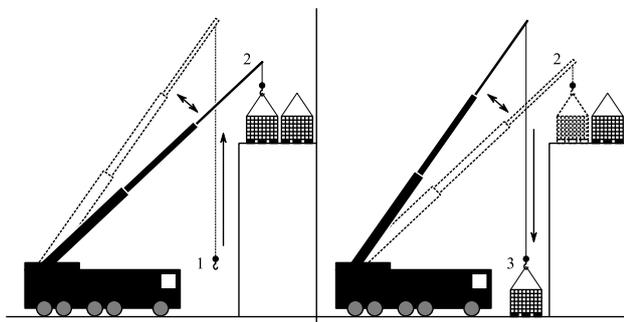


Abbildung 1. Übliches Lastspiel mit schwankender Vorspannkraft; Das Hubseil wird ohne Last mit geringer Vorspannkraft aufgewickelt (1), um eine Last an erhöhter Position anzulegen (2). Die angelegte Last wird als nächstes auf den Boden befördert (3), während das Seil mit größerer Vorspannkraft abgewickelt wird.

Weiterhin entspannt eine zu geringe Seilvorspannung das bestehende Wickelpaket auf der Trommel, wodurch sich die nachfolgenden Wicklungen nicht ordnungsgemäß aufbauen. Folglich bauen sich ein ungleichmäßiges Wickelpaket und eine inhomogene Pressungsverteilung auf. Letztere ist durch lokale Pressungsspitzen gekennzeichnet, die die Seillebensdauer verringern. Die Relativbewegung zwischen den Seilsträngen, die beim Entspannen des Wickelpakets entsteht, verursacht zusätzlichen Verschleiß durch Reibung. Außerdem besteht, wie [Verreet 2018] erläutert, bei einer zu geringen Seilvorspannung die Möglichkeit, dass die unteren Seillagen infolge einer hohen Zugkraft – wenn etwa die maximale Nutzlast des Hubwerks anliegt – seitlich verdrängt werden und sich das Drahtseil nach innen einzieht (Abbildung 2a). Eine erhebliche Schädigung durch die resultierende Pressung und Reibung ist die Konsequenz. Im ungünstigsten Szenario blockiert das eingezogene Drahtseil eine weitere Abwicklung. Es kommt zur Umkehr der Wicklungsrichtung auf der Seiltrommel, wobei die entstehende dynamische Last zum Seilriss führen kann.

1.1 BISHERIGE LÖSUNGSANSÄTZE

Der Stand der Technik liefert bereits Methoden, mit denen eine Mindestseilvorspannkraft auf der Seiltrommel gewährleistet werden soll. Jede der bekannten Methoden bringt jedoch Nachteile mit sich. Eine einfache Methode aus der Praxis sieht vor, dass die maximale Seillänge des Hubwerks nicht zu groß gewählt wird. Damit soll gewährleistet werden, dass das Drahtseil (abzüglich Sicherheitswindungen) regelmäßig komplett abgewickelt wird, um es mit definierter Seilvorspannung neu aufwickeln zu können [Weiskopf 2008]. Diese Lösung verhindert jedoch nicht, dass sich die unteren Seillagen im Betrieb entspannen und

geht außerdem zulasten des Funktionsumfangs des Kran-systems (geringere maximale Hubhöhe). Letzteres ist dem Kranbetreiber schwierig zu vermitteln.

Eine weitere Methode, die bereits in der Praxis angewandt wird, ist der Einsatz von Doppelkopf-Spillwinden. Diese werden der Seiltrommel vorgeschaltet und entkoppeln reibschlüssig die Seilvorspannkraft, mit der aufgewickelt wird, von der resultierenden Seilkraft infolge der Nutzlast (Abbildung 2b). In Dauerversuchen erzielt [Wehking 2010] eine Erhöhung der Hubspielzahl um 20-40%. Jedoch wird die Anzahl der Biegewechsel, die das Seil durchläuft, durch die Doppelkopf-Spillwinde nahezu verdreifacht. Dies lässt darauf schließen, dass die potenzielle Erhöhung der Hubspielzahl durch die Kontrolle der Seilvorspannkraft noch größer ist, als an der Doppelkopf-Spillwinde festgestellt wurde, da die zusätzlichen Biegewechsel als Störfaktor auftreten.

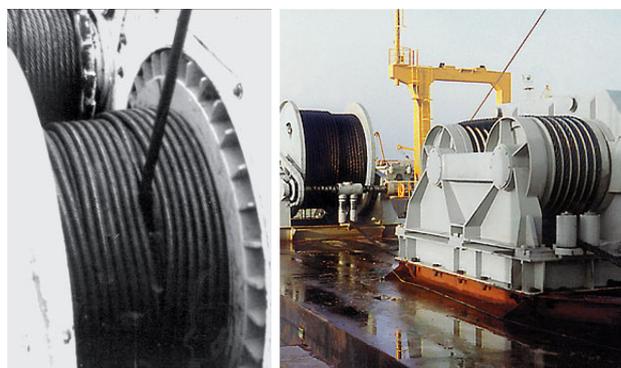


Abbildung 2. Seilschädigung infolge mangelnder Seilvorspannung und Lösungsansatz; a) Einziehen eines Drahtseils [Verreet 2018], b) Doppelkopf-Spillwinde im Einsatz [Steen 2020]

Diesen Punkt greift das IGF-Vorhaben Nr. 19606 BR / 1 „Hochleistungstreibsystem für die Seilkraftregulierung in mehrlagig bewickelten Seiltrommeln“ (Forschungsvereinigung Intralogistik / Fördertechnik und Logistiksysteme (IFL) e. V) auf. Das entwickelte Hochleistungstreibsystem (im weiteren seilkraftregelndes Hubwerk genannt) reduziert die zusätzlichen Biegewechsel auf einen einzigen, indem statt einer Doppelkopf-Spillwinde eine (Magnet-)Treibscheibe verwendet wird. Eine kombinierte Drehmoment-/Drehzahlregelung von Seiltrommel und Treibscheibe dient der kontinuierlichen Regelung der Seilvorspannkraft.

2 FUNKTIONSWEISE DES SEILKRAFTREGELNDEN HUBWERKS

Das seilkraftregelnde Hubwerk besteht grundlegend aus zwei Komponenten: Der Seiltrommel, auf die das Seil gewickelt wird und der zusätzlichen, vorgeschalteten Treibscheibe. Seiltrommel und Treibscheibe werden von jeweils einem Servomotor angetrieben. Während über den Antrieb der Treibscheibe die Fördergeschwindigkeit des

seilkraftregelnden Hubwerks geregelt wird, dient der Antrieb der Seiltrommel der kontinuierlichen Seilkraftregulierung. Abbildung 3 zeigt den grundlegenden Aufbau des seilkraftregelnden Hubwerks. Als Treibscheibe kommt am Demonstrator aufgrund ihrer überlegenen Treibfähigkeit die Magnettreibscheibe, die bereits an der Professur für Technische Logistik untersucht wurde, zum Einsatz [Gräbner 2008, Herhold 2008]. Bei dieser wird an der Treibscheibe die Hubkraft F_{S1} nicht nur durch die Seilvorspannkraft F_{S2} , sondern auch durch eine magnetische Streckenlast q erzeugt. Die auf die Treibscheibe einwirkenden Kräfte sind in Abbildung 4 dargestellt. Für herkömmliche Treibscheiben ohne zusätzliche Magnetkraft ergibt sich die Seilreibung mit der Euler-Eytelwein-Gleichung [Balke 2010] zu

$$\frac{F_{S1}}{F_{S2}} = e^{\mu\beta} \quad (1)$$

Unter Verwendung der um die zusätzliche Magnetkraft erweiterten Euler-Eytelwein-Gleichung [Herhold 2008] ergeben sie die Seilkräfte an der Magnettreibscheibe zu

$$\frac{F_{S1}}{F_{S2}} = e^{\mu\beta} + \frac{q \cdot \frac{D}{2} \cdot (e^{\mu\beta} - 1)}{F_{S2}} \quad (2)$$

Funktionsprinzip
 seilkraftregelndes Hubwerk

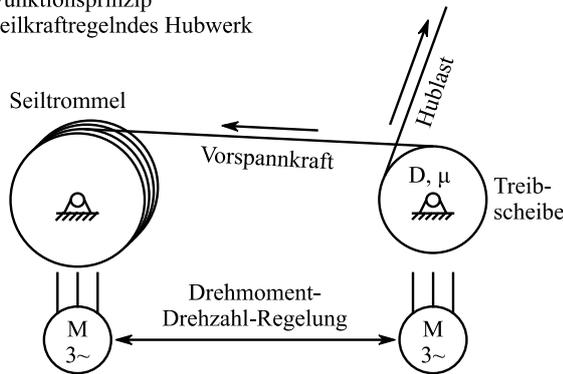


Abbildung 3. Aufbau des seilkraftregelnden Hubwerks

An Gl. (2) lässt sich feststellen, dass die trommelseitige Seilkraft von der lastseitigen durch die Installation der vorgeschalteten Magnettreibscheibe abweicht. Dies ermöglicht es, die Seiltrommel unabhängig von der Hublast mit konstanter Seilkraft zu bewickeln. Die eingangs geschilderten Wicklungsstörungen bei der mehrlagigen Bewicklung von Seiltrommeln sollen so vermieden werden und eine erhöhte Seillebensdauer wird erwartet. In Gl. (2) gehen die relevanten Systemparameter ein. Während F_{S1} aus der Hublast resultiert und infolgedessen vorgegeben ist, kann durch die Manipulation von β , μ und D die minimal nötige trommelseitige Seilkraft F_{S2} verändert werden. Dabei bewirkt die Änderung der verschiedenen Systemparameter unterschiedliche Nebeneffekte. Eine Erhöhung von β auf über 270° erfordert, je nach konkreter Ausfüh-

rung der Seilwinde, zusätzliche Führungselemente, um einen Kontakt zwischen auf- und ablaufendem Seilende zu verhindern. Die Erhöhung von D führt zu einer erhöhten Trägheit des Treibscheibenantriebs. Die Verringerung von D ist durch Vorgaben zum D/d -Verhältnis begrenzt. Der Reibwert μ wird durch die eingesetzte Materialpaarung Seil/Treibscheibenrinne und den Seilschmierstoff bestimmt und kann nur begrenzt variiert werden. Nach Gl. (2) lässt sich die minimal nötige trommelseitige Seilkraft F_{S2} bestimmen, die einen Lauf des Seils über die Treibscheibe ohne Rutschen gewährleistet.

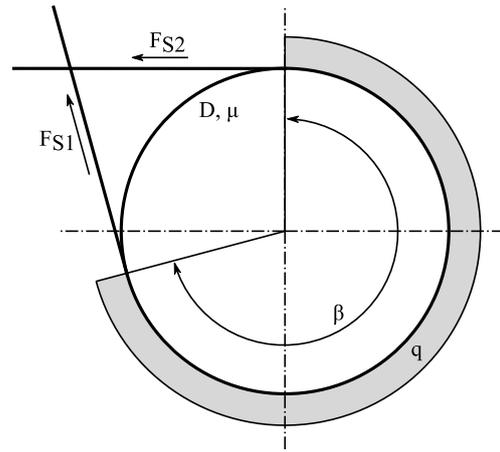


Abbildung 4. Lastfall an Magnettreibscheibe

D	Treibscheibennennendurchmesser in m
F_{S1}	Seilkraft infolge der Hublast in N
F_{S2}	Seilkraft, mit der die Seiltrommel bewickelt wird in N
q	magnetische Streckenlast in N/m
β	Umschlingungswinkel in $^\circ$
μ	Reibwert

2.1 HUBWERKSSTEUERUNG

Abbildung 5 zeigt schematisch den Aufbau der Regelung, die zum Betrieb des seilkraftregelnden Hubwerks nachgebildet wurde. Um Seiltrommel und Treibscheibe im Betrieb aufeinander abzustimmen, ist eine kombinierte Drehmoment-Drehzahl-Regelung der Antriebe notwendig. Die Fördergeschwindigkeit des Hubwerks wird über den Inkrementalgeber des Treibscheibenantriebs drehzahl- und die Seilvorspannkraft über den Antrieb der Seiltrommel drehmomentgeregelt. Letzteres geschieht mittelbar über das Abtriebsdrehmoment, das an der Drehmomentstütze des Motors über das Hebelgesetz und einen Druckkraftsensor bestimmt wird. Zu beachten ist hierbei, dass sich beide Regelungen gegenseitig beeinflussen. So führt etwa eine

Erhöhung oder Verringerung der Drehzahl des Treibscheibenantriebs je nach Drehrichtung zu einer Spannung oder Entspannung des Drahtseils.

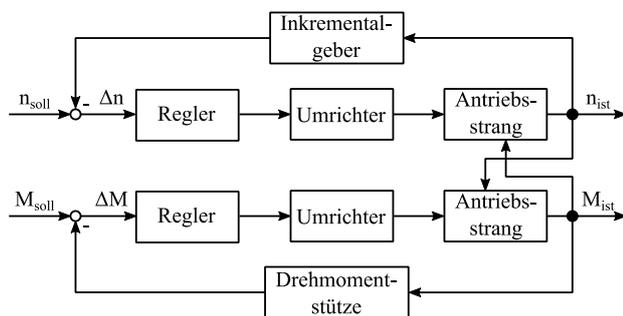


Abbildung 5. Blockdiagramm der Hubwerkssteuerung

3 EXPERIMENTELLE UNTERSUCHUNG DER DRAHTSEILERMÜDUNG

Das vorgestellte seilkraftregelnde Hubwerk ist ein neuartiges Windenkonzept, dessen theoretischer Nutzen experimentell validiert werden muss. Dauerspulversuche, bei denen ein Drahtseil bis zum Versagen auf der Seiltrommel auf- und abgewickelt wird, dienen dazu, das grundsätzliche Ermüdungsverhalten sowie die Betriebs- und Lebensdauer des Drahtseils zu bestimmen.

3.1 VERSUCHSAUFBAU

Die Dauerspulversuche erfolgten auf einem eigens entwickelten Windenprüfstand zur automatischen Auf- und Abwicklung eines mehrlagigen Wickelpakets. Das Prinzip des Seilverlaufs am Prüfstand ist in Abbildung 6 zu sehen. Von der mehrlagig bewickelten Seiltrommel (nachfolgend „Prüftrommel“) verläuft das Seil über mehrere Umlenkrollen zur Magnettreibscheibe und zur einlagig bewickelten zweiten Seiltrommel (nachfolgend „Lasttrommel“). Ein Lastspiel umfasst das Auf- und Abwickeln der festgelegten Seillänge und führt beim gespulten Seilstück zu zehn Biegewechseln. Prüftrommel und Magnettreibscheibe stellen das zu testende seilkraftregelnde Hubwerk dar. Weiterhin ist die Prüftrommel praxisüblich mit einer Funktionsrillung der Hersteller Lebus versehen. Diese teilt die Seillagen in Parallel- und Kreuzungsbereiche, unterstützt den Aufbau des homogenen Wickelpakets und reduziert den Verschleiß an den Kontaktstellen zwischen den Seillagen. Die Lasttrommel dient dazu, eine variierende Hublast beim Auf- und Abwickeln zu erzeugen, wie sie im Betrieb auftreten kann. Dazu ist die Lasttrommel drehmomentgeregelt. Abbildung 7 zeigt den realen Prüfstand im Versuchsfeld der Forschungsstelle, an dem der Demonstrator des seilkraftregelnden Hubwerks montiert ist.

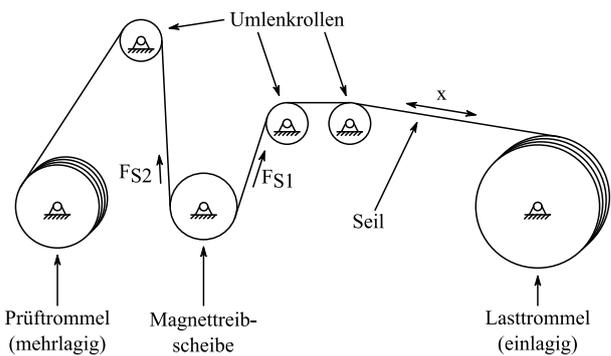


Abbildung 6. Schematische Darstellung des Prüfstands

Zur Durchführung von Kontrollversuchen ohne Seilkraftregelung ist es möglich, die (Magnet-)Treibscheibe nicht anzutreiben und als Umlenkrolle zu verwenden. In diesem Fall werden die an der Lasttrommel erzeugten Schwankungen für F_{S1} direkt an die Prüftrommel weitergeleitet. Die drehzahlgeregelte Prüftrommel gibt Fördergeschwindigkeit und -richtung vor. Wenngleich das Seil direkt von der ersten Umlenkrolle nach der Prüftrommel weiter an die nächste geführt werden könnte, ist der eben beschriebene Seilweg für die Kontrollversuche vorteilhafter. Da die Anzahl der Umlenkungen beibehalten wird, bleibt die Anzahl an Biegewechseln je Lastspiel konstant. Ein Automatikbetrieb zum kontinuierlichen Auf- und Abwickeln des Seils auf/von der Prüftrommel ist möglich. Eine Drahtbruchzählung nach [DIN ISO 4309] diente dazu, den Verschleiß des Drahtseils festzustellen. Dabei wurde das Erreichen der Betriebsdauer festgehalten. Abbruchkriterium eines Versuchsdurchlaufs war das Versagen des Drahtseils durch Litzenbruch.



Abbildung 7. Prüfstand im Versuchsfeld

3.2 VERSUCHSPLAN

Die Dauerspülversuche folgten dem Versuchsplan in Tabelle 1. Dieser besteht aus acht Versuchsdurchläufen und dient dem Vergleich einer herkömmlichen Trommelwinde mit den seilkraftregelnden Hubwerk. Die Werte für die Seilkraft F_{S1} betragen mit 1 kN und 4 kN ca. 2% und 8% der Mindestbruchkraft des verwendeten Drahtseils. Die untere Grenze von F_{S1} zu 2% der Mindestbruchkraft des Drahtseils entspricht der Empfehlung des Herstellers der Funktionsrillung für die minimale Seilkraft, mit der die Seiltrommel nach dem Stand der Technik ohne Seilkraftregelung ordnungsgemäß bewickelt werden kann [Seidenather 2007]. Die obere Grenze für F_{S1} zu 8% der Mindestbruchkraft orientiert sich an den Möglichkeiten der Versuchsumgebung und bildet eine übliche Hublast ab. Ziel der Variation von F_{S1} beim Auf- und Abwickeln in den Kontrollversuchen war die gezielte Erzeugung von ungleichen Spannungszuständen im Seil auf der mehrlagig bewickelten Prüftrommel im Betrieb ohne Seilkraftregulierung. Im Betrieb mit der neuartigen Seilkraftregulierung werden diese ungleichen Spannungszustände vermieden, indem die Seilkraftregulierung F_{S2} konstant bei 2 kN hält. Dies soll im Vergleich mit dem Kontrollversuch die Seilschädigung verringern. F_{S2} beträgt 25% der maximalen Last von $F_{S1} = 4 \text{ kN}$.

Tabelle 1. Versuchsplan der Dauerspülversuche

Durchlauf	Regelung	Schlagrichtung	Konstante Faktoren
1	ja	zZ	Drahtseil: 8 16x7-WSC 1960 U
2	nein	zZ	Treibscheibe: Magnet- treibscheibe wolframcar- bidbeschichtet
3	nein	zZ	Schmierstoff: Werkstoffzustand
4	ja	sZ	auf-/abzuwickelnde Seil- lagen: 3 bis 6
5	ja	zZ	Fördergeschwindigkeit: 3,6 m/min
6	ja	zZ	Seilkraft F_{S2} bei akti- ver Regelung: 2 kN

Die während der Versuche nicht veränderten Parameter sind ebenfalls in Tabelle 1 angegeben. Das getestete drehungsfreie, unverdichtete Drahtseil 8 mm 16x7-WSC 1960 U ist zur Anwendung als Hubseil in Mobil-, Raupen- und Turmdrehkränen geeignet. Verdichtete Seilkonstruktionen flossen zunächst nicht in die Betrachtung ein. In Vorversuchen fiel die Wahl auf eine wolframcarbiddeschichtete Magnettreibscheibe. Diese erzeugt mit dem gewählten Drahtseil einen Reibwert von $\mu = 0,43 \pm 0,04$. Innerhalb

eines Lastspiels wurden die Lagen 6 bis 3 auf- und abgewickelt. Es ergeben sich vier bewegte Lagen und mit Lage 2 eine Totlage, auf der die letzte bewegte Seillage auf- und abläuft. Lage 1, die noch durch die Funktionsrillung geführt wird, ist nicht Gegenstand der Untersuchungen. Mit der Leistung der verwendeten Antriebe und den gewählten Seilkräften F_{S1} und F_{S2} ergibt sich eine Fördergeschwindigkeit von 3,6 m/min.

4 RESULTATE UND DISKUSSION

Nachfolgend werden die Ergebnisse der durchgeführten Versuchsreihe vorgestellt und diskutiert.

4.1 BETRIEBS- UND LEBENSDAUER

Abbildung 8 zeigt die Betriebs- und Lebensdauer, die die Drahtseile in den einzelnen Versuchsdurchläufen erzielten. Sowohl Betriebs- als auch Lebensdauer steigen durch den Einsatz der Seilkraftregelung (blau) gegenüber den Kontrollversuchen (rot) signifikant, im arithmetischen Mittel um 85% (Betriebsdauer) bzw. 39% (Lebensdauer). Da die Betriebsdauer stärker ansteigt als die Lebensdauer, lässt sich feststellen, dass Restlebensdauer sinkt, die nach Erreichen der Ablegereife im Drahtseil verbleibt. Somit kann ein größerer Teil der Lebensdauer des Drahtseils für den Betrieb genutzt werden. Dies bedeutet, dass das Drahtseil in zweierlei Hinsicht wirtschaftlicher betrieben werden kann.

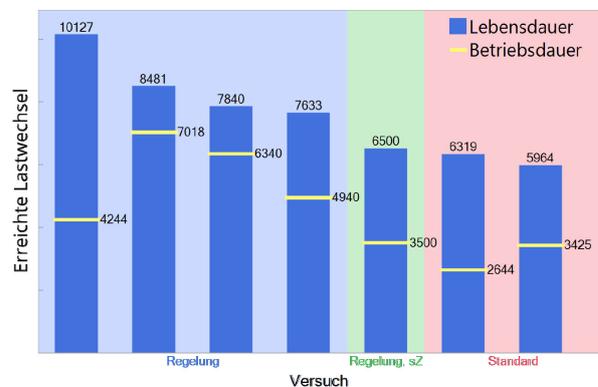


Abbildung 8. Betriebs- und Lebensdauer der einzelnen Dauerspülversuche

Der Versuch mit einem Drahtseil gleicher Konstruktion, das sich lediglich durch die Verseilung der Litzen in Kreuzschlag (Schlagrichtung sZ) unterscheidet, weist ein ähnliches Ermüdungsverhalten wie die Kontrollversuche auf. Da im Kreuzschlag verseilte Litzen auf mehrlagig wickelnden Seiltrommeln grundsätzlich nachteilig sind, müsste das getestete Drahtseil ein deutlich schnelleres Ermüdungsverhalten aufweisen. Dies deutet ein eindrucksvolles Verbesserungspotenzial durch das seilkraftregelnde Hubwerk in anderen Anwendungsfällen an. Da es sich hier

jedoch nur um einen einzelnen Versuch handelt, dient dessen Ergebnis nur einem ersten Screening weiterer Anwendungsmöglichkeiten.

Über den Versuchszeitraum wurden sieben Versuche durchgeführt, die durchschnittlich drei Wochen dauerten (exklusive Stillstandzeiten durch Drahtbruchzählung). Die geringe Anzahl an möglichen Versuchsdurchläufen, die der langen Dauer eines Durchlaufs geschuldet ist, begrenzt die statistische Aussagekraft. Tabelle 2 listet einige statistische Kennzahlen der durchgeführten Versuchsreihe auf. Dabei fällt auf, dass der Standardfehler der Betriebsdauer und Lebensdauer für die Kontrollversuche und die Versuche mit Seilkraftregelung bei relativer Betrachtung ähnlich ausfällt. Bei der Betrachtung des 95% Konfidenzintervalls fällt die Größe des Intervalls auf. Diese lässt sich auf die eingangs

beschriebene geringe Versuchsanzahl zurückführen und unterstreicht die Wichtigkeit weiterer Versuchsreihen.

4.2 DRAHTBRUCHENTWICKLUNG

Abbildung 9 zeigt die Drahtbruchentwicklung, die jedes Drahtseil im Versuchsdurchlauf erfahren hat. Es lässt sich feststellen, dass das Drahtseil mit dem seilkraftregelnden Hubwerk eine signifikant höhere Anzahl an Drahtbrüchen erfährt, bis es zum Seilversagen kommt. Dies zeigt, dass das Drahtseil mit dem seilkraftregelnden Hubwerk gleichmäßiger beansprucht wird, als es im Kontrollversuch der Fall war, wo die Lebensdauer bei einer geringeren Anzahl an Drahtbrüchen erreicht wurde. Die Summe der Drahtbrüche über den durchlaufenen Lastspielen verhält sich für alle Versuche exponentiell.

Größe	Statistische Kennzahl	Kontrollversuche	Seilkraftregelung (zZ)
Betriebsdauer	Mittelwert	3035	5636
	Standardfehler	391	634
	Relativer Standardfehler	13%	11%
	Ergebnis (95% Konfidenzintervall)	3035±766	5636±1243
Lebensdauer	Mittelwert	6142	8520
	Standardfehler	178	565
	Relativer Fehler	3%	7%
	Ergebnis (95% Konfidenzintervall)	6142±349	8520±1107

Tabelle 2. Statistische Kennzahlen der Dauerspulversuche

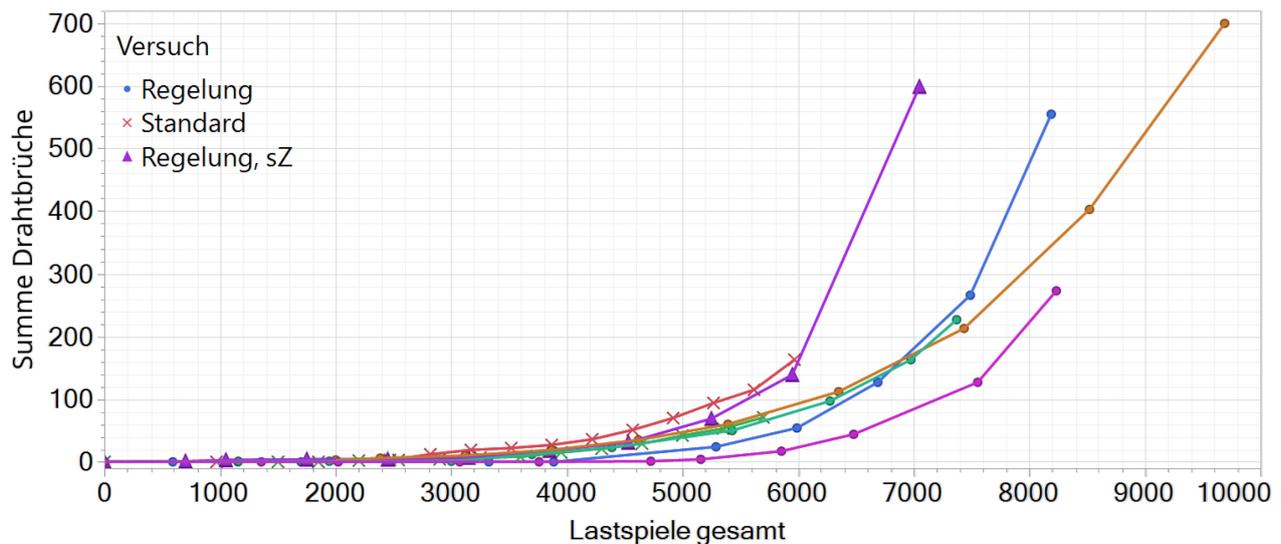


Abbildung 9. Drahtbruchentwicklung über der Anzahl der Lastspiele

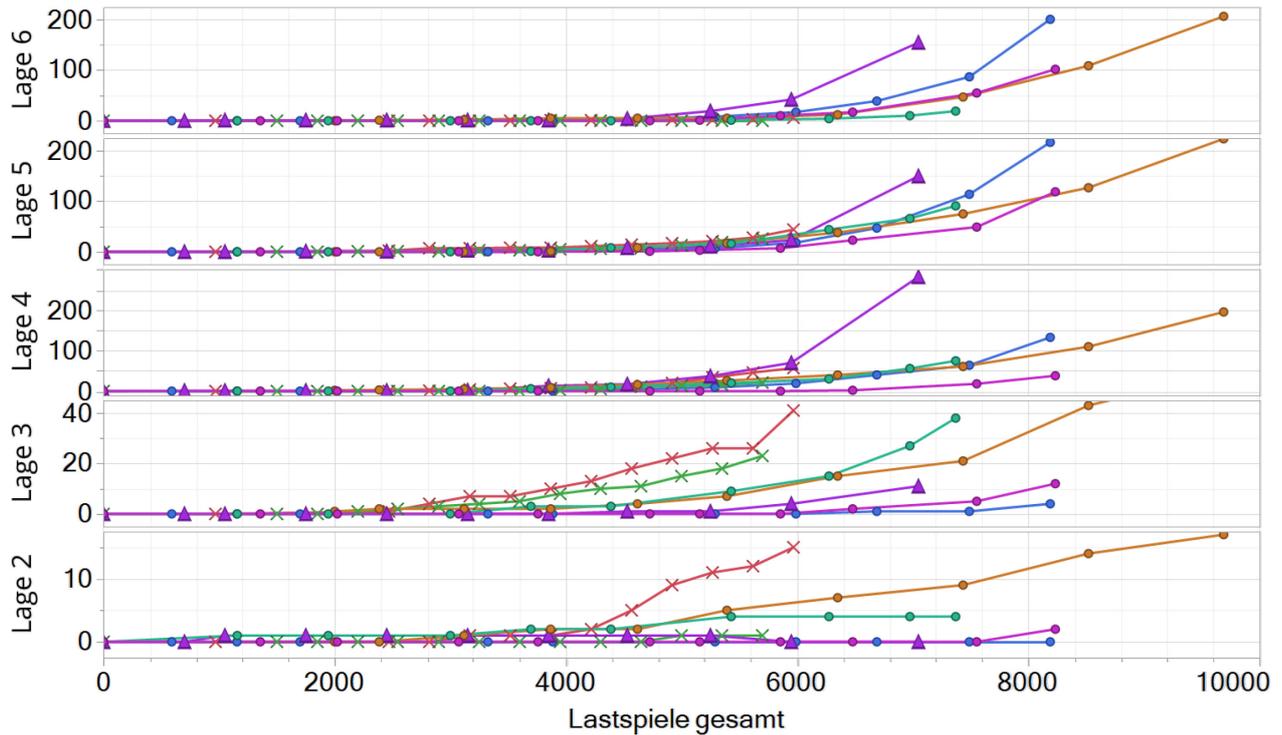


Abbildung 10. Drahtbruchentwicklung, Detailansicht 2000 bis 8000 Lastspiele

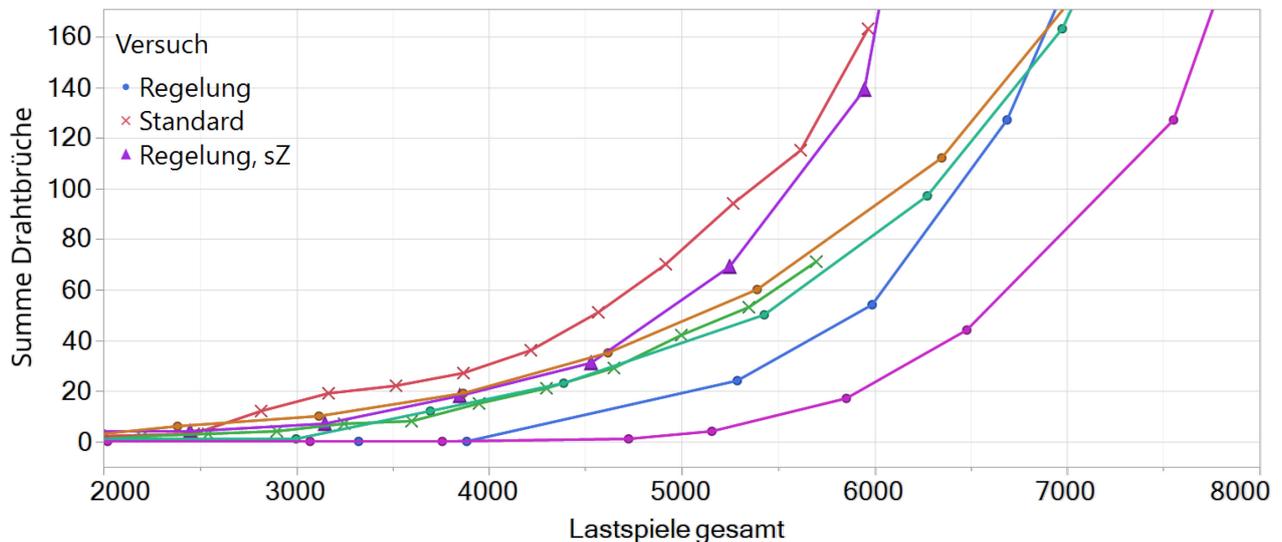


Abbildung 11. Drahtbruchentwicklung, getrennt nach Seillage

Abbildung 10 stellt Bereich zwischen 2000 und 8000 Lastspielen aus Abbildung 9 vergrößert dar. Es ist zu sehen, dass die Kurven der Versuche mit Seilkraftregelung im Diagramm etwa 500 Lastwechsel weiter rechts liegen als die der Kontrollversuche. Dies lässt den Schluss zu, dass sich die Drahtbruchentwicklung bei den Versuchen mit Seilkraftregelung verlangsamt und ist einer der Gründe für die höhere Betriebsdauer mit Seilkraftregelung.

Abbildung 11 stellt die Drahtbruchentwicklung je Seillage dar, indem in fünf getrennten Diagrammen die

Summe der Drahtbrüche der Lagen zwei bis sechs aufgetragen ist. Während sich die Entwicklung in den höheren Lagen vier bis sechs für Seilkraftregelung und Kontrollversuch ähnelt, treten in Lage drei – der untersten gespulten Lage des Wickelpakets – deutliche Unterschiede auf. Dort ist eine Verlangsamung der Drahtbruchentwicklung zu beobachten, die die Verläufe der Versuche mit Seilkraftregelung etwa 2000 Lastwechsel weiter nach rechts verschiebt. Dies ist ein weiterer Grund, weshalb die Betriebsdauer des Drahtseils durch das seilkraftregelnde Hubwerk steigt, da

die unteren Lagen auf herkömmlichen mehrlagig wickelnden Seiltrommeln besonders beansprucht werden. Für die oberste ungespulte Lage zwei kann aus den Versuchsdaten kein Effekt des seilkraftregelnden Hubwerks abgeleitet werden.

4.3 NORMATIVE BETRACHTUNG DER DRAHTBRUCHENTWICKLUNG

Da seilkraftregelnde Hubwerke aufgrund der zusätzlichen Treibscheibe anders auf das Drahtseil einwirken, muss diskutiert werden, ob sich daraus Anpassungsbedarf hinsichtlich der Ablegekriterien aus [DIN ISO 4309] ergibt. Dort wird zwischen einlagiger und mehrlagiger Wicklung unterschieden, da sich in Abhängigkeit davon das Verhältnis zwischen inneren und äußeren Drahtbrüchen verschiebt. Tabelle 3 zeigt die Anzahl der Drahtbrüche, die einzelne Seilstücke nach Erreichen der Lebensdauer auf der Oberfläche des Kerns aufweisen. Dazu wurden aus allen betrachteten Seillagen Stücke von 50 cm Länge geöffnet und manuell untersucht. Es fand sich keine Abweichung in der Anzahl der Drahtbrüche. Dies lässt den Schluss zu, dass das Ermüdungsverhalten des Seilkerns im Betrieb mit seilkraftregelnden Hubwerken im selben Verhältnis zur Lebensdauer steht wie mit konventionellen Hubwerken. Deshalb liegt es nach aktuellem Kenntnisstand nahe, für seilkraftgeregelter Hubwerke weiterhin das Ablegekriterium für mehrlagig wickelnde Seiltrommeln zu verwenden.

Tabelle 3. *Drahtbruchanzahl auf dem Seilkern*

Lage	Versuch	Drahtbrüche Kern
6	Seilkraftregelung	55
	Kontrollversuch	53
5	Seilkraftregelung	64
	Kontrollversuch	64
4	Seilkraftregelung	3
	Kontrollversuch	1
3	Seilkraftregelung	0
	Kontrollversuch	0
2 (ungespult)	Seilkraftregelung	0
	Kontrollversuch	0

5 ZUSAMMENFASSUNG

Die aktive Seilkraftregelung des vorgestellten neuartigen Windenkonzepts ermöglicht es, ein mehrlagiges Wickelpaket bei gleichmäßigerem Spannungszustand aufzubauen. Möglich wird dies durch eine zusätzlich vorgeschaltete Treibscheibe, die aufgrund der auftretenden Seilreibung die anhängende Hublast von der Seilvorspannkraft im Wickelpaket entkoppelt. Treibscheibe und Seiltrommel funktionieren durch ein Zusammenspiel innerhalb

einer Drehmoment-Drehzahl-Regelung. Diese gewährleistet unabhängig von der Bewegungsrichtung und -geschwindigkeit zu jedem Zeitpunkt eine konstante Seilvorspannkraft.

Indem die verwendeten Drahtseile seltener getauscht werden müssen, ist es möglich, Kransysteme wirtschaftlicher zu betreiben. Die Betriebs- und Lebensdauer erhöhte sich in einer Versuchsreihe um durchschnittlich 85% bzw. 39%. Da der Anstieg der Betriebsdauer den der Lebensdauer deutlich übersteigt, sinkt die Restlebensdauer, die nach dem Ablegen des Drahtseils im Betrieb verbleibt.

Die Drahtbruchentwicklung der getesteten Drahtseile verlangsamt sich beim Betrieb mit dem seilkraftregelnden Hubwerk signifikant. Dies ist dem gleichmäßigeren Spannungszustand im mehrlagigen Wickelpaket zuzuschreiben. Hierdurch verteilt sich die Drahtbruchentwicklung gleichmäßiger über die gespulte Seillänge, wodurch bis zum Seilversagen eine deutlich größere Gesamtanzahl an Drahtbrüchen auftritt. Überproportional verlangsamt sich die Drahtbruchentwicklung in der untersten gespulten Seillage. Dies deutet auf darauf hin, dass übliche Verschleißmechanismen in mehrlagigen Wickelpaketen verringert werden. Nicht festgestellt wurde eine Zunahme der inneren Drahtbrüche am Seilkern, weshalb sich nach aktuellem Kenntnisstand die Verwendung der Ablegekriterien für herkömmliche mehrlagig wickelnde Hubwerke empfiehlt.

Für den Einsatz seilkraftregelnder Hubwerke in kommenden Kransystemen sind weitere Untersuchungen notwendig. Wichtig sind die etwa die Auswirkungen unterschiedlicher Seil- und Trommelkonstruktionen, des Seildurchmessers, verschiedener Lastkollektive und der Fördergeschwindigkeit auf die Betriebsdauer und das Ermüdungsverhalten des Drahtseils. Dennoch lassen die durchgeführten Untersuchungen bereits ein enormes Verbesserungspotenzial erkennen.

LITERATUR

- [Balke 2010] Balke, H.: Einführung in die Technische Mechanik - Statik, 3. Auflage, Berlin: Springer, 2010, ISBN 978-3-642-10397-1
- [DIN ISO 4309] DIN ISO 4309:2013-06, Krane - Drahtseile - Wartung und Instandhaltung, Inspektion und Ablage
- [Gräbner 2008] Gräbner, P.: Die Magnettreibscheibe als Basis leichter Konstruktion, in: Hebezeuge Fördermittel, 2008, 48(5), S. 356–359
- [Herhold 2008] Herhold, R. und Leonhardt, T.: Einsatz von Magnettreibscheiben zur Erhöhung der Treibfähigkeit, in: Krause, F. und

Horn, P. (Hrsg.): Von innovativer Kran-
technik bis Virtual Reality. 16. Interna-
tionale Kranfachtagung 2008 ; Begleit-
band zur Kranfachtagung am 18. April
2008 in Magdeburg. Als Ms. gedr. Mag-
deburg: LOGiSCH, 2008. ISBN 978-3-
930385-67-6

- [Schulze 2018] Schulze, M., Lohrengel, A., Recknagel,
T. und Schmidt, T.: Lebensdauer und
Wickelverhalten kunststoffummantelter
Drahtseile, in: Schmidt, T. (Hrsg.):
Krane im Fokus von Ressourcenschon-
ung und Energieeffizienz. 26. Kran-
fachtagung : 8. März 2018 : Tagungs-
band mit den 17 Fachbeiträgen.
[Dresden]: Selbstverlag der Techni-
schen Universität Dresden, 2018, S.
101-116. ISBN 3867805601
- [Seidenather 2007] Seidenather, C.: Keeping it smooth,
in: International Cranes And Specialized
Transport, 2007, (10), S. 51–53, URL:
[http://www.lebus-germany.com/Down-
loads/dl-international-cranes-0710.pdf](http://www.lebus-germany.com/Downloads/dl-international-cranes-0710.pdf)
(2019-01-22)
- [Steen 2020] K. Christian Steen GmbH + Co. KG
(Hrsg.): Steen Deck Machinery - Mer-
chant Ships, URL:
[https://www.steengmbh.de/sites/mer-
chant/merchant.html](https://www.steengmbh.de/sites/merchant/merchant.html) (2020-04-03)
- [Verreet 2018] Verreet, R.: Spezialeile für mehrlagig
bewickelte Seiltrommeln, Aachen, DE,
2018 - Broschüre, URL: [http://drahtseil-
technik.com/bro_dt/Bro_Mehrla-
gen_de.pdf](http://drahtseil-technik.com/bro_dt/Bro_Mehrla-
gen_de.pdf) (2020-03-30)
- [Wehking 2010] Wehking, K.-H.: Erhöhung der Seille-
bensdauer bei der Mehrlagenwicklung
in Kranen, Stuttgart, DE, 2010 - Ab-
schlussbericht, URL: [http://ifl-for-
schung.de/documents/1916591/2788121
0/Erh%C3%B6hung%20der%20Seille-
bensdauer%20bei%20der%20Mehrla-
genwicklung%20in%20Kra-
nen/df87991c-9de1-1b8f-4552-
36c46e6c7cb9?t=802516](http://ifl-for-
schung.de/documents/1916591/2788121
0/Erh%C3%B6hung%20der%20Seille-
bensdauer%20bei%20der%20Mehrla-
genwicklung%20in%20Kra-
nen/df87991c-9de1-1b8f-4552-
36c46e6c7cb9?t=802516) (2020-02-06)
- [Weiskopf 2008] Weiskopf, U.: Untersuchung zur Le-
bensdauer von Kranhubseilen in der
Mehrlagenwicklung, Stuttgart, 2008,
Dissertation

Dipl.-Ing. Raimond Hofmann, research assistant at the
Chair of Material Handling, Technische Universität Dres-
den.

Raimond Hofmann is born 1992 in Lauf a. d. Peg., Ger-
many. He has studied mechanical engineering from 2011
to 2018, holds a degree (Dipl.-Ing) from TU Dresden.
Since then, he has been working at the Chair of Material
Handling. His research areas are wire rope analysis, espe-
cially multi-layer spooling, and developing novel lifting
equipment. His current works also include additively man-
ufactured components for material handling equipment.

Address: Technische Universität Dresden, Faculty of Me-
chanical Science and Engineering, Institute of Material
Handling and Industrial Engineering, Chair of Logistics
Engineering, 01062 Dresden, Germany.
Phone: +49 351 463-36744
Fax: +49 351 463-35499
E-Mail: raimond.hofmann@tu-dresden.de

Prof. Dr.-Ing. habil. Thorsten Schmidt, Head of the
Chair of Material Handling, Dresden University of Tech-
nology

Thorsten Schmidt is full professor at the TU Dresden and
heads the Chair of Material Handling in the Mechanical
Engineering faculty since 2008. He holds a diploma de-
gree 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 produc-
tion systems including a focus on the machinery and com-
ponents involved. He currently works on energy efficient
control strategies in material flow, fast approximation in
early planning stages by means of standard design mod-
ules, online data analysis, formal verification of control
logic, performance analysis of decentral and self-con-
trolled systems, lightweight structures in material handling
and stress analysis on wire ropes and toothed belts, respec-
tively.

Address: Technische Universität Dresden, Faculty of Me-
chanical 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