

Hochleistungsklemmwinden – Lösung des Zielkonflikts „Treibfähigkeit und Seilschonung“

High traction clamp hoists to solve the conflict between maximum lifetime of the rope and traction of the hoist

**Paul Schumann
Thorsten Schmidt
Thomas Leonhardt**

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

In der Materialflusstechnik besteht seit der Erfindung des Seils das Ziel, hohe Seilzugkräfte bei gleichzeitiger Seilschonung zu erreichen. Bisher sind diese Ziele unvereinbar. Aus diesem Grund wurde an der Professur für Technische Logistik der Technischen Universität Dresden eine neue Generation von Winden entwickelt, die diesen Ansprüchen genügen.

[Schlüsselwörter: Seilschonung, Hochleistungsklemmwinden, extreme Treibkraft, hohe Fördergeschwindigkeit, Kompaktheit]

Combining high pulling forces with an extended material lifetime has been an ongoing challenge regarding the use of wire ropes. Solutions have been merely satisfactory at best. For this reason the department of Engineering Logistics at Dresden's University of Technology has developed a new generation of winches which not only meet these demands but also elevate standards to new heights.

[Keywords: increasing the wire rope lifetime, clamp hoist apparatus, extreme traction force, high conveying speed, compactness]

1.1 STAND DER TECHNIK

1.2 WINDEN UND DEREN PROBLEME

Nach dem Stand der Technik ist es nicht möglich auf kompakten Bauraum, große Treibkräfte zu erzeugen, ohne das Seil zu schädigen.

Die in Abbildung 1a dargestellte und weit verbreitete Variante ein Seil durch eine Seiltrommel anzutreiben, ist durch folgende Nachteile gekennzeichnet. Aus Platzgründen, wird das Seil in mehreren Lagen übereinander aufgewickelt. Dabei sind die unteren Seillagen oftmals sehr lose gewickelt. Wirkt dann in den oberen Seillagen eine große Kraft, kann es zum Einschneiden des Seils kom-

men. Dies bedeutet in vielen Fällen die Ablegereife des Seils. Des Weiteren finden bei Trommelwinden an der Seiloberfläche nur Punktberührungen statt. Diese führen zu hohen lokalen Pressungen und zur Zerstörung einzelner Seildrähte.

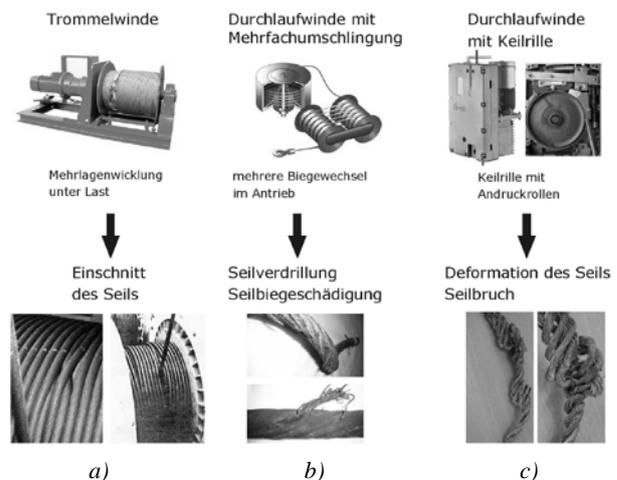


Abbildung 1. Etablierte Seilantriebsarten und deren Probleme: a) Trommelwinden [[Tran11]S1.]; b) Durchlaufwinden mit Mehrfachumschlingung [[Rot16]S.3]; c) Durchlaufwinden mit Keilrille [URL1], [URL2]

Die in Abbildung 1b dargestellte Möglichkeit ein Seil durch mehrfachumschlungene Treibscheiben anzutreiben, ist ebenfalls durch viele Nachteile gekennzeichnet. Durch die zur Erzeugung einer ausreichenden Treibkraft notwendigen mehrfachen Treibscheibenumschlingungen kommt es beim Durchlaufen des Seils durch die Winde zu vielen Biegewechseln. Jeder Biegewechsel schädigt das Seil. Hinzu kommt eine Seilverdrillung infolge der notwendigen seitlichen Ablenkung.

Die in Abbildung 1c dargestellte Möglichkeit, ein Seil durch lediglich eine Treibscheibe und Seilandruckmechanismen anzutreiben, ist nach dem Stand der Technik ebenfalls nicht zur Lösung des thematisierten Zielkon-

flikt geeignet. Die Treibfähigkeit wird bei derartigen Mechanismen durch keilförmige Rillen (siehe Abbildung 3) auf Kosten einer sehr hohen Seilbeanspruchung erzwungen. Das Seil berührt die Treibscheibe nur durch einen Linienkontakt. Zusätzlich drücken Andruckrollen mit sehr geringen Biegeradien das Seil in die Rille. Eine weitere Linienbelastung wirkt auf das Seil ein und schädigt dieses.

1.3 ZIELKONFLIKT

Die zwischen Treibscheibe und Seil wirkenden Zusammenhänge werden in der Eytelweinschen Gleichung beschrieben (siehe Abbildung 2). Es wird deutlich, dass es durch drei Größen möglich ist, die Treibkraft F_1 zu maximieren. Bei gleicher Seilkraft im entlasteten Seilabschnitt, die bei Durchlaufwinden auch Null sein kann, bleiben nur die Möglichkeiten der Maximierung des Umschlingungswinkels und des Reibwerts.

Nach dem Stand der Technik ist der maximal mögliche Umschlingungswinkel bei einer Rille von 270° bereits ausgereizt. Wie in Abbildung 4 ersichtlich, hängt dieser Sachverhalt damit zusammen, dass sich der ein- und auslaufende Seilabschnitt kreuzen. Der hohe Umschlingungswinkel wird durch ein seitliches aneinander Vorbeiführen der Seilenden erreicht.

$$F_1 = e^{\mu \alpha_w} S_2$$

- F_1 maximale mögliche Treibkraft
- S_1 wirkende Seilkraft durch Last
- S_2 Seilkraft im entlasteten Seilabschnitt
- α_w Umschlingungswinkel
- μ Reibwert Treibscheibenrille

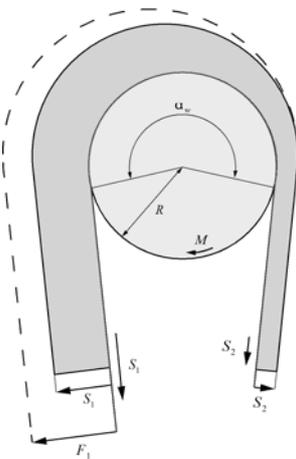


Abbildung 2. Berechnungsmodell für die Eytelweinsche Gleichung [[Paj89] S. 205]

Nach dem Stand der Technik wurden Bestrebungen unternommen, durch geeignete Rillenmaterialien und entsprechende Seilkonstruktionen den Reibwert zu erhöhen. Des Weiteren bietet die Form der Rille, eine Möglichkeit zur Steigerung des Reibwerts. Die Formen von Rillen sind in Abbildung 3 dargestellt.

Um einen hohen Reibwert zu erzielen, werden bei Seildurchlaufwinden sehr steile Keilrillen verwendet. Negativ ist bei dieser Möglichkeit, dass das Seil sehr stark verformt und damit mechanisch hoch beansprucht wird. Zwischen Seil und Rille findet nur noch ein Linienkontakt statt, der zu einer überhöhten Pressung führt. Hoher Ver-

schleiß von Seil und Rille sind die Folgen. [[Paj89] S. 206-207].

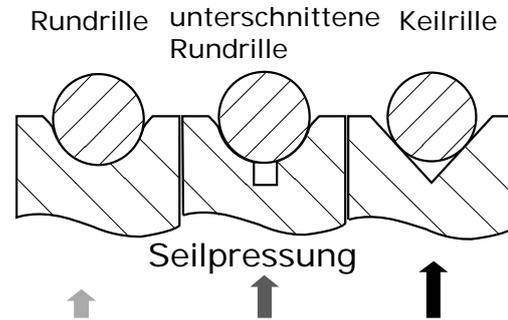


Abbildung 3. Rillenformen und die qualitative Veranschaulichung der zugehörigen Pressungen am Seil

Zur Steigerung der Treibkraft durch die Erhöhung des Reibwerts wird das Seil zusätzlich durch Andruckelemente in die Rille gedrückt. Diese sind meistens Rollen oder Klemmelemente, die das Seil mit einer weiteren Biegestelle im Linienkontakt belasten. Dieser Sachverhalt ist schematisch in Abbildung 4 ersichtlich.

Aus der beschriebenen Situation wird das technische Problem deutlich. Die Realisierung einer hohen Treibkraft einer Seildurchlaufwinde bedingt stets eine hohe Belastung von Seil und Rille, beziehungsweise der Andruckkörper. Hoher Verschleiß der Reibschlusspartner ist die Folge.

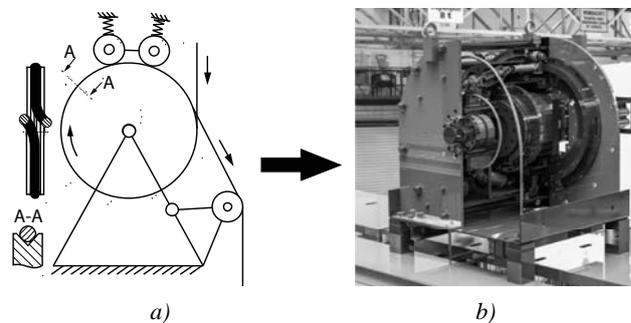


Abbildung 4. Zielkonflikt bei Winden und dessen Lösung: a) Stand der Technik: sehr steile, seilschädigende Keilrillen; b) Hochleistungsklemmwinde.

2 HOCHLEISTUNGSKLEMMWINDEN

Zur Lösung des aktuellen Widerspruchs zwischen Treibfähigkeit und Seilschonung wird bei Hochleistungsklemmwinden eine seilschonende Rundrille genutzt. Die Treibkrafterhöhung wird durch flächig auf das Seil wirkende Andruckelemente erreicht. Das Seil ist über dem Seilumfang flächig umschlossen. Die Seilbeanspruchung bleibt trotz hoher Klemm- und Treibkräfte gering.

Der Prototyp der Hochleistungsklemmwinde ist in Abbildung 5 dargestellt. Die Darstellung veranschaulicht

die Kompaktheit und Systemintegration der Hochleistungsklemmwinde.

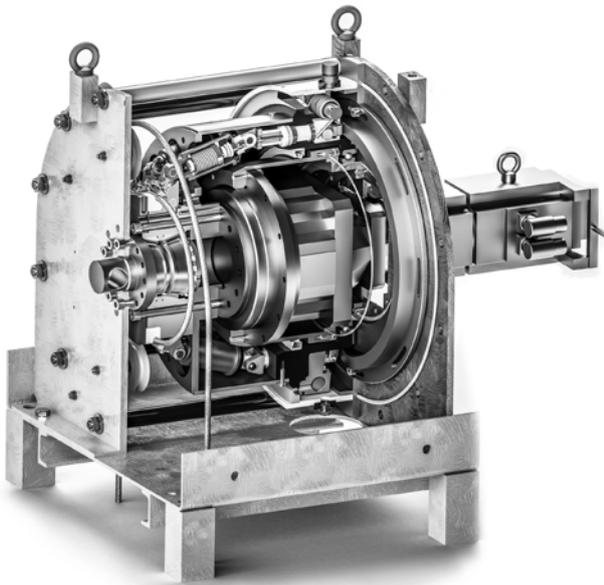
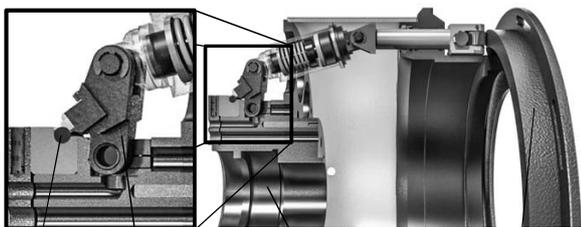


Abbildung 5. Isometrische Teilschnittansicht einer Hochleistungsklemmwinde

2.1 PRINZIP

Nach dem Einlaufen des Seils auf die Treibscheibe wird das Seil von Klemmbacken auf nahezu dem gesamten Seilumfang umgriffen. Anstatt einer schädigenden Linienlast wirken durch die flächigen Andruckelemente Flächenlasten.



Seil Klemm- Treibscheiben Kurven-
 backe -körper -scheibe

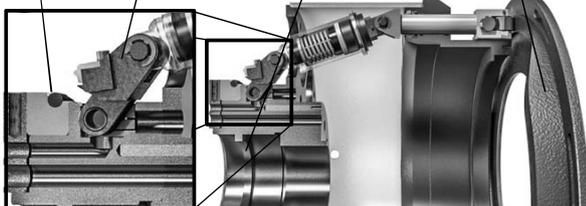


Abbildung 6. Funktionsprinzip der Hochleistungsklemmwinde: oben: Klemmmechanismus geschlossen; unten: Ein- oder Auslaufen auf oder von der Treibscheibe, Klemmmechanismus geöffnet

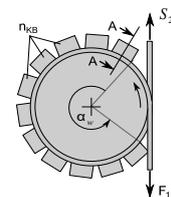
Dadurch wird ein maximales Maß an Seilschonung garantiert. Bevor das Seil die Treibscheibe verlässt, öffnet der Klemmmechanismus die Klemmbacke und gibt das Seil frei. Die Steuerung erfolgt mechanisch und robust

durch eine Kurvenbahn. Der Umschlingungswinkel beträgt 270° und reizt somit die maximale, verfügbare Fläche zur Herstellung des Reibschluss zwischen Seil, Treibscheibe und Klemmbacken aus. Dadurch ist es möglich, Seilwinden mit konkurrenzlosem Leistungsprofil herzustellen.

2.2 SKALIERBARE TREIBKRÄFTE

Die Eytelweinsche Gleichung beschreibt die Treibkraft an herkömmlichen Treibscheiben. Für Hochleistungsklemmwinden wurde die erweiterte Eytelweinsche Gleichung erarbeitet. Diese ist in Abbildung 7 dargestellt. Damit lassen sich Hochleistungsklemmwinden für jegliche Art von Seilzugaufgaben skalieren.

$$F_1 = (S_2 e^{\mu \alpha_w}) + \frac{n_{KB} F_{KB} \cos \xi}{\alpha_w} (e^{\mu \alpha_w} - 1) + n_{KB} F_{KB} \mu_{KB} + n_{KB} F_{KB} \mu \sin \xi$$



F_{KB} Klemmkraft pro Klemmbacke
 n_{KB} Anzahl tragender Klemmbacken
 μ_{KB} Reibwert zwischen Seil und Klemmbacke
 ξ Angriffswinkel der Klemmkraft

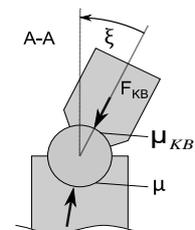


Abbildung 7. Erweiterte Eytelweinsche Gleichung zur Beschreibung der Treibkräfte in Hochleistungsklemmwinden

Der aktuelle Entwicklungsstand ermöglicht Anwendungen mit folgenden Parametern:

- Seildurchmesser d 5 mm bis 56 mm
- Zugkräfte 1 kN bis 340 kN
- Treibscheibendurchmesser D entsprechend gewünschtem D/d
- Seilpressung bis 9 MPa

Berechnungen der Treibkräfte mit der erweiterten Eytelweinschen Gleichung sind in Abbildung 8 dargestellt.

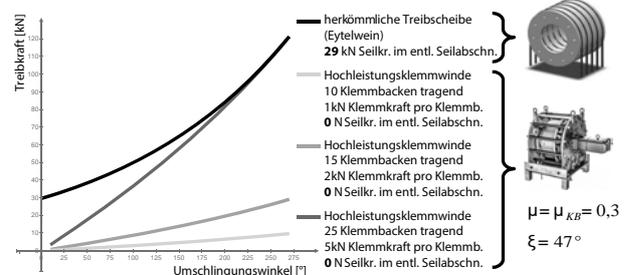


Abbildung 8. Skalierbarkeit von Hochleistungsklemmwinden

Dabei ist auffällig, dass die zu Vergleichszwecken in Abbildung 8 dargestellte gewöhnliche Treibscheibe eine

erhebliche Seilkraft von 29 kN im entlasteten Seilabschnitt benötigt, um die gleiche Treibkraft, wie eine Hochleistungsklemmwinde mit der Seilkraft gleich Null im entlasteten Seilabschnitt zu erzeugen. Die Hochleistungsklemmwinde verfügt in diesem Fall über 25 Klemmbacken, die das Seil mit jeweils 5 kN in die Rille drücken.

2.3 INNOVATIONEN

Mit Hochleistungsklemmwinden ist es möglich, unterschiedlichste Anforderungen zu erfüllen.

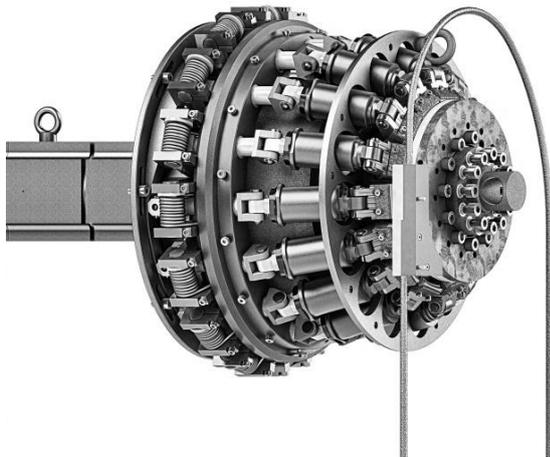


Abbildung 9. Hochleistungsklemmwinde mit abgenommenem Gehäuse und Trägerrohr

Grundsätzlich sind alle Hochleistungsklemmwinden mechanisch robust ausgelegt und erfüllen höchste Anforderungen an die Betriebssicherheit. Abbildung 9 verdeutlicht das. Eventuell eindringender Schmutz fällt einfach durch die Hochleistungsklemmwinde hindurch. Alle bewegten Teile sind abgedichtet. Die Hochleistungsklemmwinden basieren auf einer Aluminiumkonstruktion.

Um Hochleistungsklemmwinden in extrem verschmutzten Umgebungen zu betreiben, können die in Abbildung 10 dargestellten Seilabstreifmöglichkeiten angewendet werden.

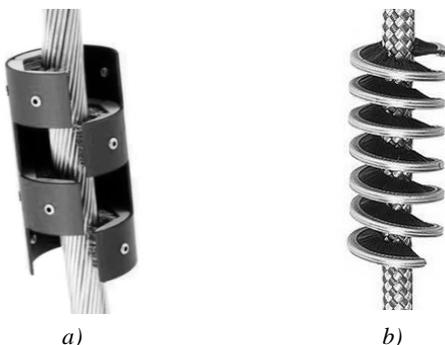


Abbildung 10. Seilabstreifer: a) Ausführung für Stahlseile [URL3]; b) Ausführung für textile Faserseile [URL4]

In Abbildung 11 wird der Seilverlauf in der Hochleistungsklemmwinde deutlich. Dabei ist ersichtlich, dass von

der Treibscheibe der maximal mögliche Umschlingungswinkel von 270° genutzt wird. Des Weiteren ist erkennbar, dass das belastete Seil (linke Seite) nur einen Einfachbiegewechsel vollzieht. In Kombination mit dem großflächigen Seilandruck der Klemmbacken können so höchste Treibkräfte mit hoher Seilschonung kombiniert werden.

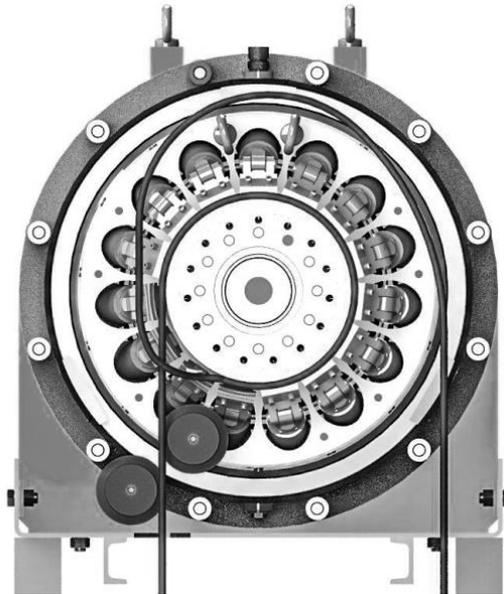


Abbildung 11. Schnittansicht der Hochleistungsklemmwinde zur Veranschaulichung des Seilverlaufs

In Abbildung 12 ist eine Klemmbacke mit Quick Swap™ Technologie dargestellt. Dies bedeutet, dass das Klemmbackenfutter sowie die Rille mit wenigen Handgriffen austauschbar sind. Dadurch können Verschleißteile schnell und kostengünstig ausgetauscht werden.

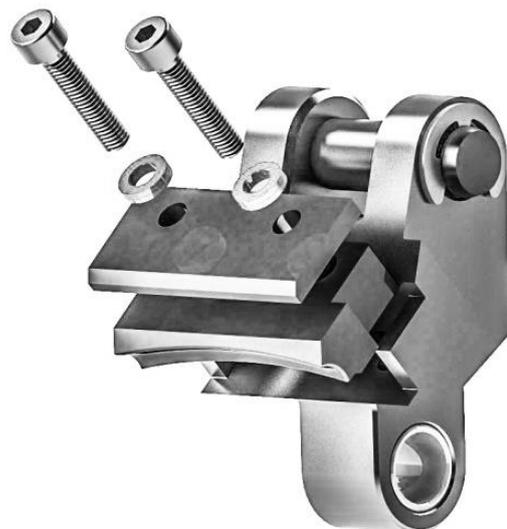


Abbildung 12. Quick Swap™ Technologie

Des Weiteren ist eine einfache Modifizierung der Hochleistungsklemmwinden möglich. Als Futtermaterialien sind Stahl, Stahl mit Wolframcarbidbeschichtung, Becorit und Tec-be-Plast gelb zertifiziert. Dadurch kön-

nen Hochleistungsklemmwinden für unterschiedlichste Ansprüche konfiguriert werden.

Die in Abbildung 13 dargestellte Auto Clamp™ Technologie ermöglicht den Ausgleich von Seil-, Rillen und Klemmbackenfutterverschleiß mit konstant bleibender Kraft. Diese Technologie ermöglicht ebenfalls den Betrieb mit unterschiedlichsten Seilarten. Die Querdruckstabilität des Seils spielt für Hochleistungsklemmwinden keine Rolle. Damit können je nach Anwenderbedürfnis die gewünschten textilen Faser oder Stahlseile zum Betrieb genutzt werden.

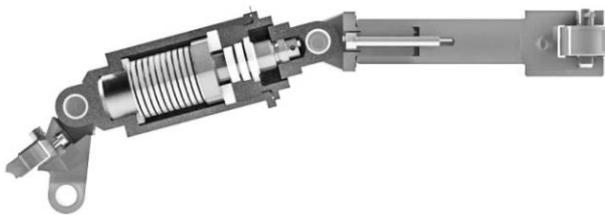


Abbildung 13. Auto Clamp™ Technologie

2.4 VIELFÄLTIGE EINSATZSZENARIEN

Durch die in Abschnitt 2.2 erläuterte Skalierbarkeit von Hochleistungsklemmwinden ist es möglich, bedarfsgerechte Konstruktionen bereitzustellen.

Eine besonders kompakte und in Bezug auf die Treibkraft, leichte Ausführung stellt die in Abbildung 14 dargestellte Variante KW 600-JM dar. Diese ist durch folgende Eigenschaften gekennzeichnet: Eigenmasse kleiner 25 kg, 8 mm Seil, D/d 26, 9 kN Treibkraft.

Die kompakte Hochleistungsklemmwinde eignet sich für mobile Anwendungen, wie sie in der ersten Zeile von Abbildung 15 dargestellt sind.

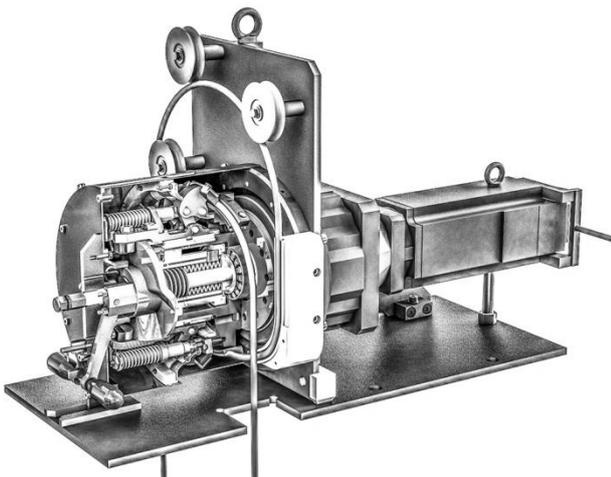


Abbildung 14. Leichtbauvariante KW 600-JM: Eigenmasse bis zu 25 kg bei 9 kN Treibkraft

In derartigen Serviceliften fährt die Winde mit der befördernden Person aus Sicherheitsgründen mit. Je leicht-

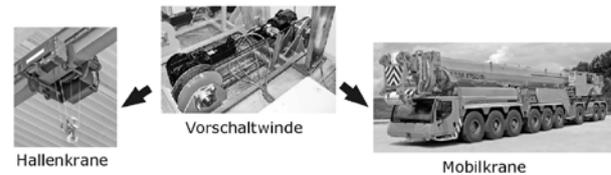
ter die Winde in diesem Fall ist, umso höher ist die Nutzmasse.

geringes Eigengewicht, mobiler Einsatz am stehenden Seil möglich



Rotorblattbefahreranlagen Wartungsaufzüge Personenaufzüge

hohe Treibkräfte, stationärer Einsatz möglich



Hallenkrane Vorschaltwinde Mobilkrane

Abbildung 15. Einsatzszenarien für Hochleistungsklemmwinden

Des Weiteren eignen sich Hochleistungsklemmwinden aufgrund ihrer sehr hohen Treibkräfte auch für stationäre Anwendungen, bei denen die Winde fest montiert ist. Besonders für den Kranbereich sind Hochleistungsklemmwinden attraktiv. Es werden hohe Lasten bewegt und es treten hohe Fahrtenanzahlen auf.

2.5 WIRTSCHAFTLICHKEIT

Der Vorteil von Hochleistungsklemmwinden gegenüber dem Stand der Technik wird bei Fördermitteln und Hebezeugen die täglich im Einsatz sind besonders groß. In solchen Anlagen ist der Seil- und Windenverschleiß entscheidend. Nicht nur die Kosten für den Materialverschleiß sind für Endanwender eine erhebliche finanzielle Gewinnreduzierung. Beispielsweise sind Ausfallzeiten von Hafenkranen besonders kostenintensiv. In deren Folge kommt es zu Folgekosten für Liegezeiten und Lieferungsverzögerungen. [[Sch12] S. 2]

Der gleiche Zusammenhang gilt für Mobilkrane. Die in der Anschaffung sehr kostenintensiven Geräte müssen ständig im Einsatz sein, um die Lukrativität für den Krandienstleister zu gewährleisten. Ausfälle oder zu häufige Serviceintervalle können eine untragbare Belastung für die jeweiligen Unternehmen sein. [[Sch12] S. 2]

Allein bei der modellhaften Betrachtung der Seilkosten wird der zuvor erwähnte Sachverhalt verdeutlicht. Ein typisches Kranseil mit 16 mm Durchmesser kostet je Meter circa 14 €. Bei Förderhöhen von 120 m und fünffacher Einsicherung ergibt sich eine Seillänge von 1200 m. Dies entspricht einem Materialwert von 16 800 €. In der Regel verschleiben Seile bei Mobilkranen so, dass sie jährlich gewechselt werden müssen. [[Wei08] S. 1] Durch den seilschonenden Antrieb ist durch Vorversuche an der TU Dresden belegt worden, dass die Seillebensdauer bei Hochleistungsklemmwinden gegenüber herkömmlichen, mehrlagig gewickelten Seiltrommeln um bis zu 70 % hö-

her ist. Das bedeutet, dass Seile nur noch alle 20 Monate gewechselt werden müssen. Dies bringt wiederum eine Kostenersparnis von 6900 € pro Jahr und Kran mit sich. Ein mittleres Unternehmen mit 4 Kranen spart dadurch 27600 €. Das sind in 10 Jahren 276 000 €, die dem Unternehmen zusätzlich zur Verfügung stehen.

Die Betriebskosten von Hochleistungsklemmwinden sind äußerst gering. Verschleißteile können kostensparend und mit geringen Stillstandszeiten durch Quick Swap™ Technologie ausgetauscht werden.

Durch die Auto Clamp™ Technologie ist jegliche Art von Seilen einsetzbar. Dies wirkt sich ebenfalls günstig auf die Kosten aus, da beim Umstieg auf Hochleistungsklemmwinden bestehende Seile genutzt werden können.

Die Herstellungskosten bewegen sich trotz vieler Einzelteile auf dem Niveau der Konkurrenzprodukte. Dies wird durch eine sehr hohe Anzahl an Gleich- und Normteilen erreicht. Besonders lukrative Anwendungsbereiche für Hochleistungsklemmwinden sind nachfolgend dargestellt:

- Rotorblattbefahranlagen
- mobiler Einsatz im Baugewerbe
- mobiler Einsatz in Forst- und Landwirtschaft
- Gerüstbau
- Mobil- und Gittermastkrane
- Hafenkrananlagen
- Schachtförderanlagen

3 ZUSAMMENFASSUNG

Seile werden als Elemente zur Kraftübertragung bei der Überbrückung längerer Transportstrecken vielfältig eingesetzt. Aufgrund der Flexibilität können Kräfte durch Seilbiegung umgelenkt und Flaschenzüge realisiert werden. Die eingesetzten Seile, zumeist Stahlseile, haben dabei nur eine begrenzte Lebensdauer. Hohe Spannungsspitzen im Seil, die aufgrund von hohen lokalen Seilpressungen auftreten, wirken sich negativ auf die Lebensdauer aus.

Aus diesem Grund wurden neuartige Hochleistungsklemmwinden entwickelt, die die maximalen Pressungen auf der Seiloberfläche deutlich reduzieren und damit die Lebensdauer der eingesetzten Seile erhöhen. Im Gegensatz zum Stand der Technik läuft das Seil in einer sogenannten Rundrille auf der Treibscheibe. Die dem Seildurchmesser angepasste Rundrille führt zu einer gleichmäßigeren Verteilung der Oberflächenpressung auf das Seil. Um eine hohe Treibkraft der Klemmwinde zu erzeugen, pressen Klemmelemente das Seil zusätzlich in die

Rundrille der Treibscheibe. Dafür wurde ein Klemmsystem entwickelt, das in die Treibscheibe integriert ist. Zum Öffnen und Schließen der Klemmelemente dient eine speziell gestaltete Kurvenscheibe.

Die Entwicklung ermöglicht die Vereinbarkeit einer hohen Seilschonung bei hoher Treibkraft der Winde. Es wurde eine Gleichung zur Beschreibung der Treibkraft erarbeitet, die die Skalierbarkeit von Klemmwindenmechanismen ermöglicht.

4 FÖRDERHINWEIS

Der Prototyp wurde in einem ZIM Kooperationsprojekt (Förderkennzeichen: KF2410609KO3, gefördert durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie) auskonstruiert und gefertigt.

LITERATUR

- [Paj89] Pajer G., Scheffler M., Gräbner P., Adam G., Kurth F.: *Fördertechnik, Unstetigförderer 1*, 5. Ausgabe, Berlin: VEB Verlag Technik, 1989, ISBN: 3-341-00647-8
- [Rot16] Rotzler Deutschland GmbH & Co. KG: *The unique operating principle of the Treibmatic / 7*. Steinen: 2016, Firmendokument
- [Sch12] Schossig P.: *Intelligentes Drahtseil (INSEIL)*. In: Projektsteckbrief INSEIL, BMBF – Photonik Forschung Deutschland, 2012, Bericht
- [Tran11] Transprotec GmbH: *Seilwinden*. Hamburg: 2011, Firmendokument
- [Wei08] Weiskopf U.: *Lebensdauer von Kranhubseilen*, In: Hebezeuge Fördermittel Heft Nr. 48 (2008)

INTERNETQUELLEN

- [URL1] <http://www.rosinski-hebezeuge.de/Greifzug/MotorSeilZug/X3000.jpg>, Stand: 10.08.2016
- [URL2] http://www.ballschmidt-hebezeuge.de/Tirak_repariert__600.jpg, Stand: 10.08.2016
- [URL3] <http://www.vetter-kabel.de/uploads/fotos/560400.jpg>
- [URL4] http://i7.buena.es/1/5036/7c7c19e85837545d5cab232552775973_250x250.jpg, Stand: 10.08.2016
-

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

Paul Schumann is research assistant at the Chair of Logistics Engineering and his fields of research are radically new hoisting systems and their influence according to the wire rope lifetime. He studied mechanical engineering between 2006 and 2012. After an internship at the Hansen Transmissions International NV in Belgium he wrote his diploma thesis with the topic “Development of an innovative hoist with magnetic traction sheaves for service lifts in wind turbines” at the Chair of Logistics Engineering.

Phone: +49 351 463 35339

E-Mail: Paul.Schumann@tu-dresden.de

Prof. Dr.-Ing. habil. Thorsten Schmidt, Head of the Chair of Logistics Engineering, 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.

Phone: +49 351 463 32538

E-Mail: Thorsten.Schmidt@tu-dresden.de

Dr.-Ing. Thomas Leonhardt, Head of the workgroup material handling technology, 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. His research areas are the design and optimization of magnetic traction sheaves and lifetime calculations of slewing bearings. One of his other core topics are dynamic measurements and calculations. He holds a diploma degree in mechanical engineering from the TU Dresden. He received his Ph.D. from the TU Dresden in 1989. He worked from 1987-1991 as research engineer for the company Takraf.

Phone: +49 351 463 32543

E-Mail: Thomas.Leonhardt@tu-dresden.de