

Schlussbericht

zu IGF-Vorhaben Nr. 19606 BR/1

Thema

Hochleistungstreibsystem für die Seilkraftregulierung in mehrlagig bewickelten Seiltrommeln

Berichtszeitraum

01.05.2018-31.12.2020

Forschungsvereinigung

Forschungsgemeinschaft Intralogistik / Fördertechnik und Logistiksysteme (IFL) e. V.

Forschungseinrichtung(en)

TU Dresden, Professur für Technische Logistik

Dresden, 12.02.2012

Prof. Dr.-Ing. habil. Thorsten Schmidt

Ort, Datum

Name und Unterschrift aller Projektleiterinnen und Projektleiter der
Forschungseinrichtung(en)

Gefördert durch:

Kurzfassung

Im Einsatz mit mehrlagig wickelnden Seiltrommeln unterliegen Drahtseile besonderer Beanspruchung, wodurch deren Lebensdauer verglichen mit dem Einsatz auf einlagig wickelnden Seiltrommeln auf bis zu drei bis zehn Prozent sinken kann. Einer der Hauptgründe für den höheren Verschleiß ist die ungleichmäßige Seilvorspannkraft, die sich in der Praxis durch das Heben und Senken mit unterschiedlichen Traglasten ergibt. Dadurch entsteht eine inhomogene Pressungsverteilung im Wickelpaket, die zu lokalen Spannungsspitzen, erhöhtem Verschleiß und häufigeren Wechseln des Drahtseils führt. Kransysteme mit mehrlagig wickelnden Seiltrommeln büßen so an Wirtschaftlichkeit und deren Hersteller sowie Betreiber an Wettbewerbsfähigkeit ein.

Das Hochleistungstreibsystem, von dem ein Demonstrator im abgeschlossenen Forschungsvorhaben entwickelt und untersucht wurde, verbessert das Ermüdungsverhalten, indem es die Seilvorspannkraft beim Wickeln der Trommel aktiv regelt. Das geschieht mithilfe einer vorgeschalteten Treibscheibe, die mit der Seiltrommel in einer kombinierten Drehmoment-Drehzahl-Regelung arbeitet. So ist es möglich, dass die Seilvorspannkraft konstant bleibt, während sich die Traglast im Betrieb ändert. Dauerspülversuche haben gezeigt, dass die Betriebsdauer des getesteten Drahtseils um 71% und die Lebensdauer um 39% im Vergleich zu Kontrollversuchen steigen.

Seilkraftregelnde Hubwerke nach dem Funktionsprinzip des untersuchten Hochleistungstreibsystems können in Zukunft dazu beitragen, die Wirtschaftlichkeit und Wettbewerbsfähigkeit von Hubwerken mit mehrlagig wickelnden Seiltrommeln zu erhöhen. Besonders bei Kransystemen, die große maximale Hubhöhen oder stark schwankende Traglasten aufweisen, existiert großes Verbesserungspotenzial. Als Referenzsysteme wurden Mobil-, Raupen- und Turmdrehkrane bestimmt. Das abgeschlossene Forschungsvorhaben erbringt dazu einen grundsätzlichen Nachweis über den positiven Effekt eines seilkraftregelnden Hubwerks auf die Betriebs- und Lebensdauer des getesteten Drahtseils unter konstanten Versuchsbedingungen. Um die vielversprechenden Ergebnisse mit Kenntnissen zu untermauern und die Unternehmen bei der Umsetzung seilkraftregelnder Hubwerke unterstützen, wird für kommende Untersuchungen empfohlen, verschiedene Anwendungsfälle der Referenzsysteme auf das Verbesserungspotenzial durch seilkraftregelnde Hubwerke zu testen.

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung.....	II
Inhaltsverzeichnis	III
Abbildungsverzeichnis.....	V
Tabellenverzeichnis.....	VI
1	Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse im Berichtszeitraum 7
AP 1	Eingrenzung der Arbeitsparameter..... 7
AP 1.1	Analyse der Technik, Vorschriften und Sicherheitsanforderungen 7
AP 1.2	Ermittlung der Anwendungsparameter..... 9
AP 1.3	Wahl eines Referenzsystems 10
AP 2	Tribologie – Auswahl Beschichtungsverfahren und Seilkonstruktionen..... 10
AP 2.1	Aufstellung der Anforderungen an die Beschichtung 10
AP 2.2	Vorauswahl der Beschichtungsverfahren anhand der Anforderungsliste... 11
AP 2.3	Analyse anwendungstypischer und alternativer Seilkonstruktionen..... 11
AP 3	Reibwertversuche – Vorbereitung und Ausführung 14
AP 3.1	Versuchsvorbereitungen 14
AP 3.2	Versuchsdurchführung und Auswertung 16
AP 4	Performancetest des Hochleistungstreibsystems im Labor 21
AP 4.1	Anpassung des Windenprüfstands 22
AP 4.2	Abbildung anwendungsrelevanter Szenarien am Windenprüfstand..... 23
AP 5	Bewertung der Seilschädigung..... 25
AP 5.1	Analyse des Seils auf Verschleißerscheinungen, Drahtbruchzählung 25
AP 6	Aufbereitung von Berechnungsgrundlagen zur Auslegung 30
AP 6.1	Theoretische Betrachtung zur Lastverteilung im Seiltrieb 30
AP 6.2	Berechnungsgrundlagen für Gestaltung, Dimensionierung und Betrieb 32
AP 7	Erarbeitung eines Steuerungskonzepts..... 34
AP 7.1	Beschreibung der Steuerungscharakteristik und Erarbeitung eines Steuerungskonzepts 34
AP 8	Aufbereitung der Forschungsergebnisse..... 34
AP 8.1	Abschlussbericht..... 34
2	Verwendung der Zuwendung 35
3	Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit 36

4	Ergebnistransfer in die Wirtschaft.....	36
4.1	Spezifische Transfermaßnahmen während der Projektlaufzeit	36
4.2	Spezifische Transfermaßnahmen nach Abschluss des Vorhabens.....	38
5	Literaturverzeichnis	40

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Übliches Lastspiel mit schwankender Vorspannkraft	8
Abbildung 2:	Ablauf der Versuchsvorbereitungen	14
Abbildung 3:	Reibwertprüfstand	15
Abbildung 4:	Exemplarischer Kraftverlauf über der Zeit für die Reibwertversuche.....	15
Abbildung 5:	Untersuchung der Kraftabhängigkeit des Reibwerts	18
Abbildung 6:	Boxplots der Reibwerte der Materialpaarungen mit den Kunststofftreibscheibenfuttern.....	21
Abbildung 7:	Boxplots der Reibwerte der Materialpaarungen mit den Magnettreibscheiben	21
Abbildung 8:	Demonstrator des Hochleistungstreibsystems	22
Abbildung 9:	Prüfstand für Spulversuche	23
Abbildung 10:	Betriebs- und Lebensdauer jedes Versuchs.....	26
Abbildung 11:	Drahtbruchentwicklung je Versuch über der Anzahl der durchlaufenen Lastspiele	27
Abbildung 12:	Detailansicht des Scheitelpunkts der Drahtbruchentwicklung aus Abbildung 11	28
Abbildung 13:	Drahtbruchentwicklung je Versuch über der Anzahl der durchlaufenen Lastspiele, getrennt nach Seillage.....	29
Abbildung 14:	Betriebs- und Lebensdauer der einzelnen Versuche mit zusätzlicher Betriebsdauer für eine angenommene zufällige Verteilung der Drahtbrüche	29
Abbildung 15:	Hochleistungstreibsystem zur Seilkraftregulierung.....	31
Abbildung 16:	Berechnungsvorlage zur Auslegung seilkraftregelnder Hubwerke	33
Abbildung 17:	Analysetool zur Bewertung unterschiedlicher Reibpaarungen	33
Abbildung 18:	Blockdiagramm der Drehmoment-Drehzahl-Regelung des Hochleistungstreibsystems.....	34

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Anwendungsparameter verschiedener Kransysteme	9
Tabelle 2:	Werteraum der Anwendungsparameter der betrachteten Kransysteme aus Tabelle 1	10
Tabelle 3:	Querschnitt und allgemeine Spezifikationen Casar Starlift [19].....	12
Tabelle 4:	Querschnitt und allgemeine Spezifikationen Casar Turbolift [20]	13
Tabelle 5:	Querschnitt und allgemeine Spezifikationen Brugg CTP	13
Tabelle 6:	Materialien und Prüfmassen für Reibwertversuche	16
Tabelle 7:	Statistische Kenndaten der Reibwertversuche	17
Tabelle 8:	Reibwert μ für alle Materialpaarungen mit dem Drahtseil Casar Starlift	17
Tabelle 9:	Reibwert μ für alle Materialpaarungen mit dem Drahtseil Casar Turboplast	19
Tabelle 10:	Reibwert μ für alle Materialpaarungen mit dem Drahtseil Brugg CTP	20
Tabelle 11:	Vorbereiteter Versuchsplan für die Spulversuche	24
Tabelle 12:	Tatsächlich umgesetzter Versuchsplan	24
Tabelle 13:	Statistische Kennzahlen der Dauerspulversuche	26
Tabelle 14:	Anzahl der innenliegenden Drahtbrüche im Vergleich.....	30
Tabelle 15:	Aufwand für wissenschaftliches Personal	35

1 Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse im Berichtszeitraum

Nachfolgend sind alle durchgeführten Arbeiten und die daraus resultierenden Forschungsergebnisse des abgeschlossenen Forschungsvorhabens aufgeführt.

AP 1 Eingrenzung der Arbeitsparameter

Grundlage für die Optimierung des Wickelverhaltens durch den Einsatz vorgeschalteter Magnettreibscheiben bei mehrlagig bewickelten Trommelwinden bildet die Beschreibung und Systematisierung der Seilantriebe in der Krantechnik. Neben technischen Kriterien sind auch technologische Kriterien, Einsatzbedingungen, Vorschriften und sicherheitstechnische Anforderungen zu betrachten. Aus den genannten Kriterien wurden Anwendungsparameter abgeleitet. Diese wurden auf die für Untersuchungen relevante Parametermenge eingegrenzt, um signifikante Effekte im Labor abbilden zu können.

AP 1.1 Analyse der Technik, Vorschriften und Sicherheitsanforderungen

Folgende Kenngrößen von Kransystemen lassen eine Abschätzung des Nutzens des Hochleistungstreibsystems an besagten Kransystemen zu.

Bewicklung der Seiltrommel: Je mehr Lagen übereinander aufgewickelt werden, desto größere Spannungsunterschiede können sich im Wickelpaket ausbilden. Dasselbe gilt für die Anzahl der Wicklungen je Lage. Da sich aus der Anzahl der Wicklungen und Lagen auf der Seiltrommel die aufzuwickelnde Seillänge ergibt, kann diese als Kriterium für den Nutzen des Hochleistungstreibsystems angesehen werden; größere Seillängen lassen auf ein größeres Verbesserungspotenzial schließen.

Übliche Lastspiele: Lastspiele, bei denen lastlos auf- und anschließend belastet abgewickelt wird, sind für mehrlagig bewickelte Seiltrommeln besonders kritisch. Das locker gewickelte Wickelpaket besitzt eine hohe Querverformbarkeit, wodurch es sich beim nachfolgenden Abwickeln stark verformen kann. Diese Verformung ist ein hauptsächlichlicher Schädigungsmechanismus in der Mehrlagenwicklung [1]. Im Extremfall ermöglicht die geringe Spannung im Wickelpaket das Einziehen des Drahtseils in die unteren Lagen, sodass aus Sicherheitsgründen ein sofortiger Tausch erforderlich ist. In der Praxis treten solche Lastspiele etwa auf, wenn Lasten zwischen einer erhöhten Position (z. B. Hausdach, Windkraftanlage) und Bodenniveau bewegt werden (Abbildung 1). Mobil-, Raupen- und Turmdrehkrane werden in der Praxis häufig für solche Arbeiten verwendet und weisen teils erhebliche Hubhöhen auf (siehe AP 1.2), weshalb das Verbesserungspotenzial für diese Krantypen als vielversprechend eingeschätzt wird. Da die genannten Krantypen einen großen Marktanteil besitzen, besteht bei diesen außerdem großes wirtschaftliches Potenzial durch das Hochleistungstreibsystem.

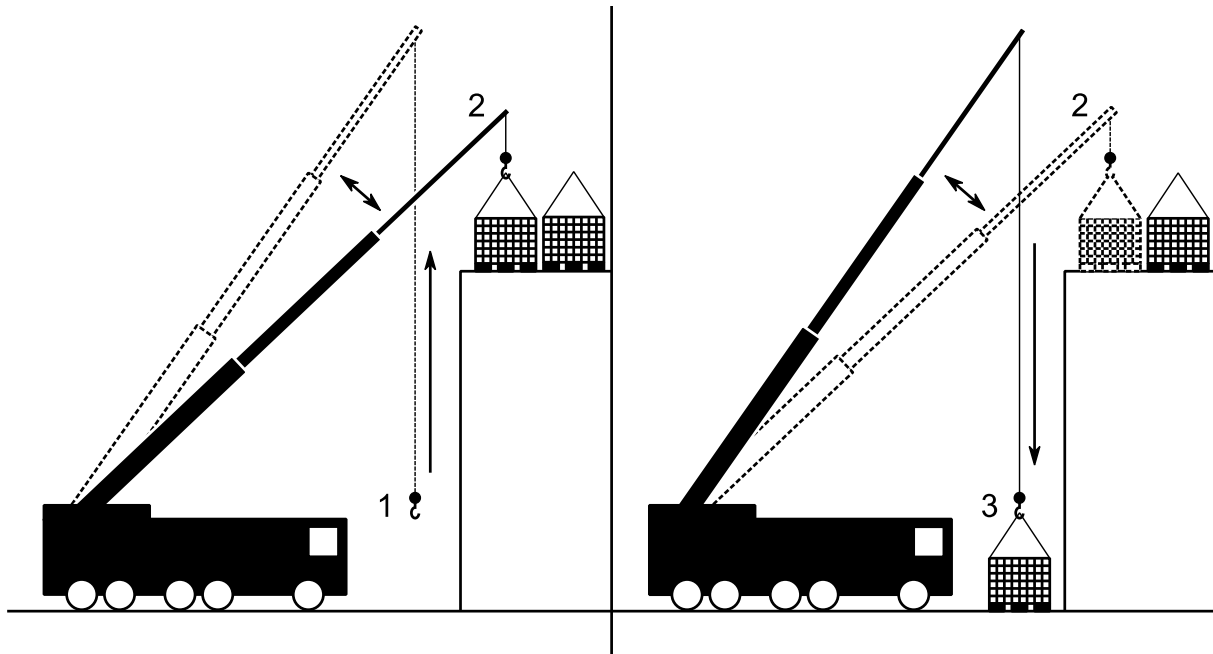


Abbildung 1: Übliches Lastspiel mit schwankender Vorspannkraft, Das Hubseil wird ohne Last mit geringer Vorspannkraft aufgewickelt (1), um eine Last an erhöhter Position anzulegen (2). Die angelegte Last wird als nächstes auf den Boden befördert (3), während das Seil mit größerer Vorspannkraft abgewickelt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

Wartungsaufwand: Während die beiden vorangegangenen Kenngrößen sich am Verschleiß des Drahtseils bzw. an der Auftrittswahrscheinlichkeit von Wicklungsstörungen orientieren, ist der Wartungsaufwand des Kransystems ebenfalls ein Indikator für den potenziellen Nutzen des Hochleistungstreibsystems. Fallen hohe Kosten an, etwa durch den Tausch besonders langer Drahtseile oder durch lange/teure Stillstandzeiten, kann die Investition in ein Hochleistungstreibsystem sinnvoll sein. Die Anwendung bei Mobil-, Raupen- und Turmdrehkränen höherer Leistungsklassen erscheint aufgrund der bereits erwähnten hohen Seillängen besonders sinnvoll.

Weiterhin lässt sich feststellen, dass der Einsatz des Hochleistungstreibsystems ausschließlich für den Einsatz am Hubseil der genannten Kransysteme sinnvoll erscheint. Nur hier werden hohe Seillängen häufig auf- und abgewickelt. Die Verwendung mit Abspann-, Katzfahr- oder Verstellseilen erscheint dagegen nicht sinnvoll, da dort die beschriebenen Anforderungen für ein signifikantes Verbesserungspotenzial nicht erfüllt sind.

Die Recherche der geltenden Normen und Vorschriften sowie sicherheitstechnischen Anforderungen ergibt folgende Grundanforderungen an ein Kransystem:

- Vorhandensein einer Rücklaufsicherung [2, S. 7 – 8]
- Vorhandensein einer Bremseneinrichtung [2, S. 8]
- Vorhandensein einer Nothalteeinrichtung [3, S. 7 – 8]
- Vorhandensein eines Lastmomentbegrenzers [3, S. 8]
- Einstufung der Hubwinde in die Triebwerksgruppe M4 [4, S. 16]
- Seilrillenradius auf Treibscheibe 0,52 bis 0,56 x Seildurchmesser [5, S. 12]
- Öffnungswinkel der Seilrille 30° bis 60° [6, S. 35]

- Vorhandensein eines Schutzes gegen Herausspringen des Seils aus der Seiltrommel [7, S. 52]
- Auswahl des Treibscheibendurchmessers nach ISO 16625 [5, S. 5 – 6]

AP 1.2 Ermittlung der Anwendungsparameter

Tabelle 1 enthält eine Aufstellung der Anwendungsparameter verschiedener Kransysteme. Für die drei betrachteten Krantypen Mobil-, Raupen- und Turmdrehkran wurde jeweils das kleinste und größte Modell der Produktpalette des Marktführers Liebherr ausgewählt, um einen maximalen Wertebereich zu definieren. Da Liebherr Krane in allen Leistungsklassen anbietet, kann diese Aufstellung stellvertretend für das herstellerübergreifende Angebot angesehen werden.

Tabelle 1: Anwendungsparameter verschiedener Kransysteme

Modell	LTM 1030-2.1	LTM 11200-9.1	LTR 1060	LR 13000	13 HM.1	1000 EC-B Litronic
Krantyp	Mobilk.	Mobilk.	Raupenk.	Raupenk.	Turmdrehk.	Turmdrehk.
Seildurchmesser in mm	13	28	15	38-52	-	-
Trommeldurchmesser ¹⁾ in mm	234	414	270	684-936	-	-
Einscherung	1-6	1-14	1-8	31	2	4-6
Hubgeschwindigkeit ²⁾ in m/min	120	135	111	128	25	32
Traglast ²⁾ in t	3,3-35	16-363	4,5-60	3000	1,5	100-125
Hubweg ²⁾ in m	150	600-950	220	240	16	111
Quellen	[8, 9]	[10]	[11]	[12–14]	[15]	[16]

¹⁾abgeleitet von einem d/D-Verhältnis von 18

²⁾wenn nur ein Wert angegeben: bei Verwendung der niedrigsten Einscherung

Tabelle 2 zeigt die große Spannweite der Anwendungsparameter für die betrachteten Kransysteme. Diese geht aus den vielfältigen Einsatzgebieten der Krane hervor.

Tabelle 2: Wertebereich der Anwendungsparameter der betrachteten Kransysteme aus Tabelle 1

Modell	Minimum	Maximum	Spannweite
Seildurchmesser in mm	13	52	39
Trommeldurchmesser ¹⁾ in mm	234	936	702
Einscherung	1	31	30
Hubgeschwindigkeit ²⁾ in m/min	25	135	110
Traglast ²⁾ in t	1,5	3000	2998,5
Hubweg ²⁾ in m	16	950	934

AP 1.3 Wahl eines Referenzsystems

Aus der großen Auswahl an verschiedenen Kransystem mit unterschiedlichen Anwendungsparametern in AP 1.2 wurde der Mobilkran geringerer Leistungsklasse als Referenzsystem ausgewählt, da die Versuchsbedingungen am Windenprüfstand diesem Kransystem am nächsten kommen. Sinnbildlich dafür steht der Mobilkran Liebherr LTM 1030-2.1. Für weiterführende Untersuchungen nach Projektende ist es sinnvoll, weitere Versuche durchzuführen, die die Einsatzbedingungen von Kransystemen größerer Leistungsklassen nachbilden. Dadurch könnte festgestellt werden, inwiefern die Erkenntnisse des abgeschlossenen Forschungsvorhabens mit der Größe des Kransystems skalieren.

AP 2 Tribologie – Auswahl Beschichtungsverfahren und Seilkonstruktionen

In diesem Arbeitspaket wurden Möglichkeiten zur Erhöhung der Treibfähigkeit durch die verwendete Materialpaarung untersucht. Geeignete Seilkonstruktionen und Treibrillenbeschichtungen/-futter wurden anhand der gestellten Anforderungen ausgewählt, um diese in AP 3 experimentell zu untersuchen.

AP 2.1 Aufstellung der Anforderungen an die Beschichtung

Die Beschichtung der vorgeschalteten Treibscheibe nimmt Einfluss auf deren tribologische Eigenschaften und muss verschiedenen Anforderungen genügen, um einen ordnungsgemäßen Betrieb des Hochleistungstreibsystems zu gewährleisten. Die Anforderungen an die Beschichtung lauten wie folgt:

- Möglichst hohe Treibfähigkeit, jedoch mindestens ein Reibwert von 0,22 bei 30° C Seiltemperatur und 0,25 bei 20° C Seiltemperatur [17, S. 7]
- Möglichst geringer mechanischer Verschleiß der Beschichtung und des Drahtseils
- Möglichst geringer chemischer Verschleiß gegenüber dem Seilschmierstoff

- Möglichst hohe Resistenz gegen Umwelteinflüsse (Kälte, Hitze, Feuchtigkeit)

Zwischen den verschiedenen Anforderungen lässt sich ein potenzieller Zielkonflikt erkennen. Eine hohe Treibfähigkeit geht häufig mit einem ebenfalls hohen mechanischen Verschleiß der Elemente der Reibpaarung (hier Drahtseil und Treibscheibe) einher. Es liegt nahe, dass für die Praxisanwendung diesbezüglich eine Kompromisslösung gefunden werden muss. Im Zuge der Reibwertversuche in AP 3 werden lediglich die Treibfähigkeit ermittelt sowie der mechanische Verschleiß bewertet.

AP 2.2 Vorauswahl der Beschichtungsverfahren anhand der Anforderungsliste

Anhand der Anforderungen aus AP 2.2 wurden die Treibscheiben für die Reibwertversuche aus AP 3 ausgewählt:

- Magnettreibscheibe mit PVD-Arc-Beschichtung
- Magnettreibscheibe mit Wolframcarbidbeschichtung
- Magnettreibscheibe mit Keramikbeschichtung
- Reguläre Treibscheibe mit Kunststofftreibscheibenfutter „Tec-Be-Plast gelb“
- Reguläre Treibscheibe mit Kunststofftreibscheibenfutter „Tec-Be-Plast grün“
- Reguläre Treibscheibe mit Kunststofftreibscheibenfutter „Tec-Be-Plast schwarz“

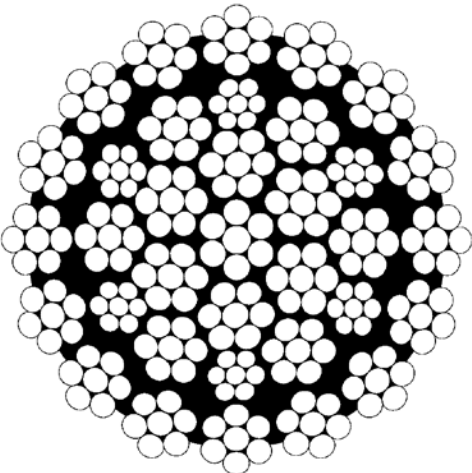
Zusätzlich zu den Varianten mit der Magnettreibscheibe, die eine hohe Treibfähigkeit bieten, wurden gleichzeitig drei Kunststofftreibscheibenfutter der Becker Treib- und Seilscheibenfutter GmbH ausgewählt. Der Grund dafür ist der in AP 2.2 geschilderte mögliche Zielkonflikt zwischen Treibfähigkeit und Verschleiß. Die weichere Oberfläche der Kunststofftreibscheibenfutter wird als schonender für das Drahtseil eingeschätzt, weswegen Kunststofftreibscheibenfutter als zusätzliche Alternative untersucht werden.

AP 2.3 Analyse anwendungstypischer und alternativer Seilkonstruktionen

Da die Seilkonstruktion einen maßgeblichen Einfluss auf das tribologische Verhalten beim Lauf über Treibscheiben besitzt, wurden drei verschiedene Seilkonstruktionen für die in AP 3 durchgeführten Reibwertversuche ausgewählt.

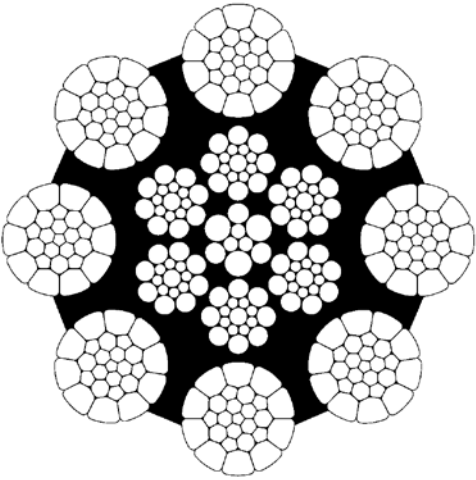
Drehungsfreies Drahtseil 8 16x7-WSC 1960 U sZ: Das Drahtseil „Starlift“ der CASAR Drahtseilwerk Saar GmbH wird zum Einsatz als Hubseil in Mobilkränen, Turmdrehkränen, Kaikranen und Hallenkränen beworben [18]. Tabelle 3 enthält die Spezifikationen des Drahtseils. Dieses Drahtseil kann als übliches Hubseil für die in AP 1.1 genannten Anwendungen im Kranbereich angesehen werden und wurde deswegen für die Reibwertversuche ausgewählt. Die Mindestbruchkraft für den gewählten Durchmesser von 8 mm beträgt 49,3 kN. Von der ebenfalls üblichen Variante „Eurolift“ wurde abgesehen. Die verdichteten Außenlitzen dieser Seilkonstruktion reduzieren den mechanischen Verschleiß bereits, wodurch das Verbesserungspotenzial mit dieser Seilkonstruktion als geringer eingeschätzt wird.

Tabelle 3: Querschnitt und allgemeine Spezifikationen Casar Starlift [19]

	Durchmesserbereich in mm	7-50	50,8-72
	Seilkategorie-Nummer (RCN)	23-2	23-2
	Anzahl Außenlitzen	16	16
	Gesamtdrahtzahl	245	349
	Anzahl der tragenden Drähte in den Außenlitzen	112	112
	Mittlerer Füllfaktor	0,653	
	Mittlerer Querschnittsfaktor	metallischer	0,513
	Mittlerer Verseilfaktor	0,76	

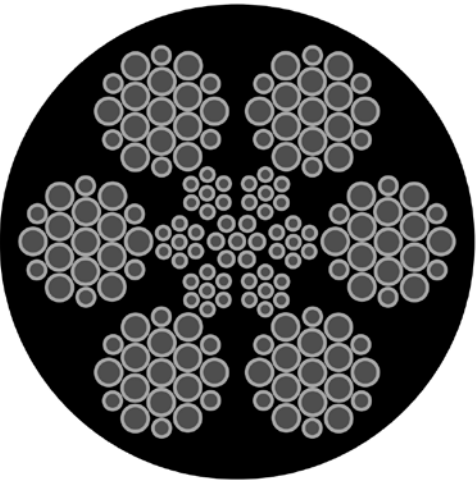
Nicht drehungsfreies Drahtseil 8 8xK26WS-EPIWRC 1960 U zZ: Das Drahtseil Casar „Turboplast“ der CASAR Drahtseilwerk Saar GmbH wird vom Hersteller zum Einsatz als Hubseil in Portalhubwagen, Containerbrücken, Stapelkränen, Schiffsentlader, Kaikranen, Hafenmobilkränen, Gießkränen und Hallenkränen beworben [18]. Dieses Drahtseil wird somit für viele andere Kransysteme als die in AP 1.1 genannten als Hubseil empfohlen und ist anders aufgebaut als das Drahtseil Starlift. Ersteres besitzt eine geringere Anzahl an größeren Außenlitzen. Um die Treibfähigkeit der unterschiedlichen Seilkonstruktionen zu betrachten, wurde das Drahtseil Casar Turboplast für die Reibwertversuche ausgewählt. Die Mindestbruchkraft für den gewählten Durchmesser von 8 mm beträgt 58,0 kN.

Tabelle 4: Querschnitt und allgemeine Spezifikationen Casar Turbolift [20]

	Durchmesserbereich in mm	8	9-24	25- 48	50- 72
	Seilkategorie-Nummer (RCN)	09	09	09	11
	Anzahl Außenlitzen	8	8	8	8
	Gesamtdrahtzahl	25 9	319	327	367
	Anzahl der tragenden Drähte in den Außenlitzen	20 8	208	208	248
	Mittlerer Füllfaktor	0,664			
	Mittlerer metallischer Querschnittsfaktor	0,552			
	Mittlerer Verseilfaktor *in N/mm ²	0,87 (1770*)/ 0,86 (1960*) / 0,86 (2160*)			

Kunststoffummanteltes Drahtseil 8.1 6x19W-IWRC 2600 sZ: Das Drahtseil Brugg „CTP“ der BRUGG Lifting AG besitzt eine Kunststoffummantelung und wird vom Hersteller zum Einsatz als Aufzugsseil beworben, weshalb es von den vorherigen Drahtseilen abweicht. Um die Auswirkung einer Kunststoffummantelung auf die Treibfähigkeit festzustellen, wurde das Brugg CTP für die Reibwertversuche ausgewählt. Die Mindestbruchkraft für den gewählten Durchmesser von 8,1 mm beträgt 33,5 kN.

Tabelle 5: Querschnitt und allgemeine Spezifikationen Brugg CTP

	Durchmesserbereich in mm	6,5	8,1
	Seilkategorie-Nummer (RCN)	04	04
	Anzahl Außenlitzen	6	6
	Gesamtdrahtzahl	163	163
	Anzahl der tragenden Drähte in den Außenlitzen	114	114
	Mittlerer Füllfaktor	0,664	
	Mittlerer metallischer Querschnittsfaktor	0,552	
	Mittlerer Verseilfaktor *in N/mm ²	0,87 (1770*)/ 0,86 (1960*) / 0,86 (2160*)	

AP 3 Reibwertversuche – Vorbereitung und Ausführung

Für die sichere Auslegung von reibschlüssigen Seilantrieben ist die richtige Reibwertannahme von großer Bedeutung. Demzufolge wurden die im AP 2 ausgewählten Seile und Treibscheiben hinsichtlich des Reibwertes untersucht. Nachfolgen ist die Vorbereitung und Durchführung der Reibwertversuche zusammengefasst.

AP 3.1 Versuchsvorbereitungen

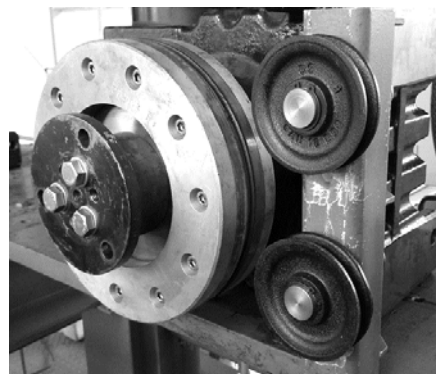
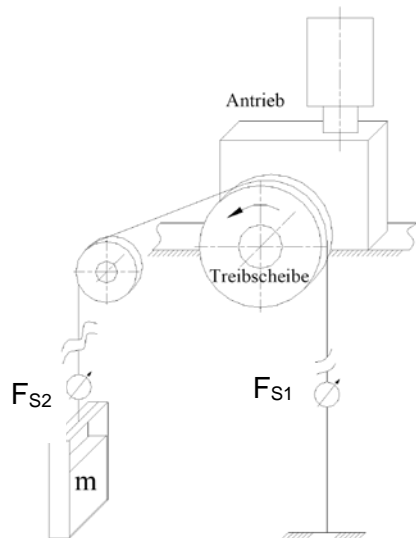
Für die Durchführung der Reibwertversuche mussten Vorbereitungen getroffen werden. Abbildung 2 veranschaulicht den Ablauf der Versuchsvorbereitungen.



Abbildung 2: Ablauf der Versuchsvorbereitungen

Die Beschaffung der Materialien umfasste die Bestellung der notwendigen Drahtseile und Kunststofftreibscheibenfutter. Die ausgewählten Magnettreibscheiben waren wegen bereits damit erfolgter Forschungsprojekte verfügbar. Um zusätzlich den Einfluss des Seilschmierstoffs zu betrachten, wurden drei verschiedene Produkte der ELASKON Sachsen GmbH & Co. KG für Spezialschmierstoffe beschafft. Die beschafften Seilschmierstoffe sind ein Universalschmierstoff (SK-U), ein Kranseilschmierstoff (UNOLIT 130) und ein Schmierstoff für Bergbauanwendungen (III Star). Neben der Nachschmierung mit den genannten Schmierstoffen wurden die gewählten Drahtseile in den Reibwertversuchen auch im Werkzustand getestet.

Die Reibwertversuche wurden am Prüfstand nach Abbildung 3a wie folgt durchgeführt: Für einen Versuch wurde das geschmierte Seil um die Treibscheibe gelegt, auf einer Seite fixiert und die andere an einem vertikal beweglichen, mit verschiedenen Prüfmassen m beladenem Gewichtskorb befestigt. Wurde die Treibscheibe nun mit linear steigendem Antriebsmoment angetrieben, rutschte diese nach Überwinden der Haftreibung unter dem Seil durch. Die Kräfte F_{S1} und F_{S2} an den beiden Seilenden stellten sich entsprechend der Lastverteilung (AP 6.1) ein und wurden mithilfe zweier Kraftmessdosen gemessen und aufgezeichnet. Um ein Durchrutschen zu gewährleisten, war es aufgrund der hohen Treibfähigkeit der Magnettreibscheiben erforderlich, den Umschlingungswinkel von 180° auf 90° zu reduzieren. Dazu dienten zwei Umlenkrollen (Abbildung 3b).

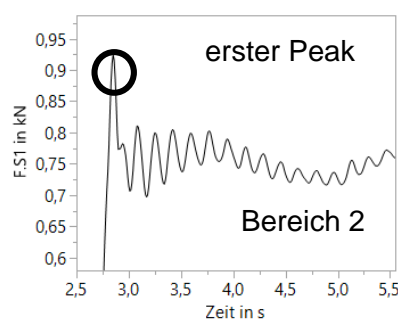
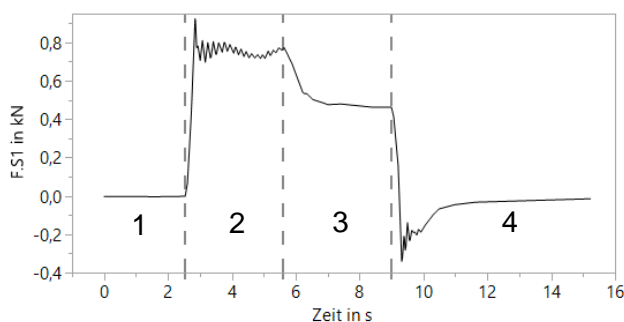


a)

b)

Abbildung 3: Reibwertprüfstand, a) Aufbau, b) Magnettreibecke mit zusätzlichen Umlenkrollen zur Verringerung des Umschlingungswinkels

Abbildung 4a zeigt einen beispielhaften Zeit-Kraft-Verlauf für F_{S1} während eines Reibwertversuchs. Es lassen sich vier verschiedene Bereiche erkennen: der Stillstand des Prüfstands (Bereich 1), der Aufbau des Drehmoments, das Spannen des Seils, das Überwinden der Haftreibung und das Durchrutschen der Treibscheibe (Bereich 2, Abbildung 3b), das Stillsetzen des Antriebs (Bereich 3) und das Reversieren des Antriebs, um das Seil zu entspannen (Bereich 4). Der ordnungsgemäße Betrieb des Hochleistungstreibsystems setzt voraus, dass das Seil nicht über die Treibscheibe rutscht. Deshalb ist es erforderlich, aus den Messdaten den jeweiligen Haftreibwert zu bestimmen. Dafür wird F_{S1} am ersten Peak in Bereich 2 und das zugehörige F_{S2} ermittelt (Bild 4b). Aus den Messwerten lässt sich mit den Berechnungsgrundlagen aus AP 6.2 der Haftreibwert μ bestimmen.



a)

b)

Abbildung 4: Exemplarischer Kraftverlauf über der Zeit für die Reibwertversuche, a) ein Durchlauf, b) Detailansicht Bereich 2

Um exakte Reibwerte für alle Materialkombinationen zu erhalten, wurde für die Reibwertversuche ein vollfaktorieller Versuchsplan erstellt. Abzüglich der Materialpaarungen, die weder unter praktischen noch theoretischen Aspekten als sinnvoll erachtet wurden – kunststoffummantelte Drahtseile werden nicht geschmiert – ergeben sich 144

Faktoreinstellungen. Jeder Versuchsdurchlauf wurde siebenmal wiederholt, wodurch sich insgesamt 1008 Versuchsdurchläufe ergeben. Tabelle 6 bietet einen vollständigen Überblick über alle verwendeten Materialien und Prüfmassen.

Tabelle 6: Materialien und Prüfmassen für Reibwertversuche

Treibscheibe	Seil	Schmierstoff	Prüfmasse m in kg
Magnettreibscheibe Wolframcarbid	Casar 8 8xK26WS-EPIWRC 1960 U zZ	Turboplast Universalschmierstoff ELASKON SK-U	37
Magnettreibscheibe Keramik	Casar 8 16x7-WSC 1960 U sZ,	Starlift Kranseilschmierstoff ELASKON UNOLIT 130	57
Magnettreibscheibe PVD-Arc	Brugg 8.1 6x19W-IWRC 2600 sZ	CTP Bergbauschmierstoff ELASKON III Star	77
Treibscheibenfutter Tec-Be-Plast gelb		Werkszustand	
Treibscheibenfutter Tec-Be-Plast grün			
Treibscheibenfutter Tec-Be-Plast schwarz			

Mit den in Vorversuchen ermittelten Standardabweichungen $s_{FS1} = 0,25 \text{ kN}$ und $s_{FS2} = 0,01 \text{ kN}$ des Messsystems für einen Einzelversuch ergeben sich bei $n = 7$ Wiederholungen die Messabweichungen für ein 95-prozentiges Konfidenzintervall, das für alle weiteren Betrachtungen verwendet wird, von

$$\Delta F_{S1} = 1,96 \cdot \frac{s_{FS1}}{\sqrt{n}} = 0,049 \text{ kN} \text{ und} \quad (1)$$

$$\Delta F_{S2} = 1,96 \cdot \frac{s_{FS2}}{\sqrt{n}} = 0,002 \text{ kN}. \quad (2)$$

Nach dem Gaußschen Fehlerfortpflanzungsgesetz berechnet sich folglich die Standardabweichung des Reibwerts mit der Seilreibung nach Euler-Eytelwein (Gleichung (5), siehe AP 6.1) zu

$$s_{\mu} = \sqrt{\left(\frac{\Delta F_{S1}}{F_{S1} \cdot \beta}\right)^2 + \left(\frac{\Delta F_{S2}}{F_{S2} \cdot \beta}\right)^2} = 0,008. \quad (3)$$

Die Fehler von q und β wurden dabei vernachlässigt, da innerhalb einer Versuchsreihe diesbezüglich keine Änderungen vorgenommen wurden. Die geschätzte Messabweichung betrug je Faktoreinstellung mit $n = 7$ Wiederholungen für die Versuchsreihe

$$\Delta \mu = 1,96 \sqrt{\frac{s_{\mu}^2}{n}} = 0,006 \approx 0,01 \quad (4)$$

und genügte der Beschreibung von Reibwerten, die zur Beschreibung der Seilreibung üblicherweise auf zwei Dezimalstellen genau erfolgt.

AP 3.2 Versuchsdurchführung und Auswertung

Nachfolgend werden die wichtigsten Resultate der Reibwertversuche vorgestellt. Tabelle 7 gibt einen Überblick über die mittleren Reibwerte, deren Standardabweichung und absoluten Fehler. Es lässt sich erkennen, dass die getesteten Materialkombinationen einen weiten Bereich von

$\mu = [0,05; 0,71]$ um den Median von $\mu = 0,38$ abdecken. Die Messunsicherheit beträgt durchschnittlich $\Delta\mu = 0,01$. und folgt somit der vorangegangenen Schätzung.

Tabelle 7: Statistische Kenndaten der Reibwertversuche

Kenngröße	Median	Minimum	Maximum	Standardabweichung	Messunsicherheit
μ	0,38	0,05	0,71	0,02	0,01

Die Resultate der Reibwertversuche sind in Tabelle 8 bis Tabelle 10 dargestellt. Tabelle 8 listet alle ermittelten Reibwerte für alle Materialpaarungen mit dem Drahtseil Casar Starlift für alle Stufen von F_{S2} auf. Auffällig ist, dass bei zunehmendem F_{S2} der Reibwert für alle Materialpaarungen mit dem Casar Starlift sinkt. Die Praxis zeigt jedoch, dass der Reibwert mit zunehmender Seilkraft F_{S2} gegen konvergiert. Nachuntersuchungen zur Kraftabhängigkeit der Materialpaarung „Tec-Be-Plast gelb, UNOLIT 130, Starlift“ bestätigen diese Annahme. Im Bereich der zulässigen Pressung beträgt der Reibwert der Materialpaarung wie in der ursprünglichen Versuchsreihe durchschnittlich $\mu = 0,27$ (Abbildung 5). Im Weiteren werden für alle Materialien die Reibwerte für $F_{S2} = 0,74 \text{ kN}$ betrachtet, sofern nicht anders angegeben.

Tabelle 8: Reibwert μ für alle Materialpaarungen mit dem Drahtseil Casar Starlift

Treibscheibe	Schmierstoff	$F_{S2} = 0,39 \text{ kN}$		$F_{S2} = 0,56 \text{ kN}$		$F_{S2} = 0,74 \text{ kN}$		
		μ	$\Delta\mu$	μ	$\Delta\mu$	μ	$\Delta\mu$	
Kunststofffutter	III Star	0,44	0,04	0,35	0,04	0,30	0,03	
	Tec-Be-Plast	SK-U	0,33	0,06	0,25	0,05	0,21	0,04
	gelb	UNOLIT 130	0,44	0,04	0,31	0,04	0,26	0,04
	Werkzustand	0,37	0,08	0,35	0,05	0,36	0,04	
Kunststofffutter	III Star	0,49	0,04	0,37	0,03	0,30	0,03	
	Tec-Be-Plast	SK-U	0,26	0,07	0,22	0,05	0,21	0,04
	schwarz	UNOLIT 130	0,25	0,07	0,23	0,05	0,22	0,04
	Werkzustand	0,35	0,08	0,31	0,06	0,29	0,05	
Kunststofffutter	III Star	0,43	0,04	0,42	0,03	0,36	0,03	
	Tec-Be-Plast	SK-U	0,34	0,06	0,28	0,05	0,24	0,04
	grün	UNOLIT 130	0,31	0,06	0,26	0,05	0,23	0,04
	Werkzustand	0,42	0,07	0,42	0,05	0,36	0,04	
Magnettreibscheibe	III Star	0,44	0,05	0,36	0,05	0,39	0,04	
PVD-Arc	SK-U	0,48	0,04	0,49	0,04	0,42	0,04	
	UNOLIT 130	0,37	0,05	0,33	0,05	0,26	0,05	
	Werkzustand	0,53	0,04	0,55	0,04	0,39	0,04	
Magnettreibscheibe	III Star	0,55	0,04	0,50	0,04	0,45	0,04	
Wolframcarbid	SK-U	0,52	0,04	0,46	0,04	0,43	0,04	
	UNOLIT 130	0,50	0,04	0,46	0,04	0,44	0,04	

Treibscheibe	Schmierstoff	$F_{S2} = 0,39 \text{ kN}$		$F_{S2} = 0,56 \text{ kN}$		$F_{S2} = 0,74 \text{ kN}$	
		μ	$\Delta\mu$	μ	$\Delta\mu$	μ	$\Delta\mu$
	Werkzustand	0,51	0,04	0,47	0,04	0,43	0,04
Magnettreibscheibe	III Star	0,40	0,05	0,35	0,05	0,35	0,04
Keramik	SK-U	0,47	0,04	0,46	0,04	0,44	0,04
	UNOLIT 130	0,38	0,05	0,37	0,05	0,35	0,04
	Werkzustand	0,42	0,05	0,40	0,04	0,37	0,04

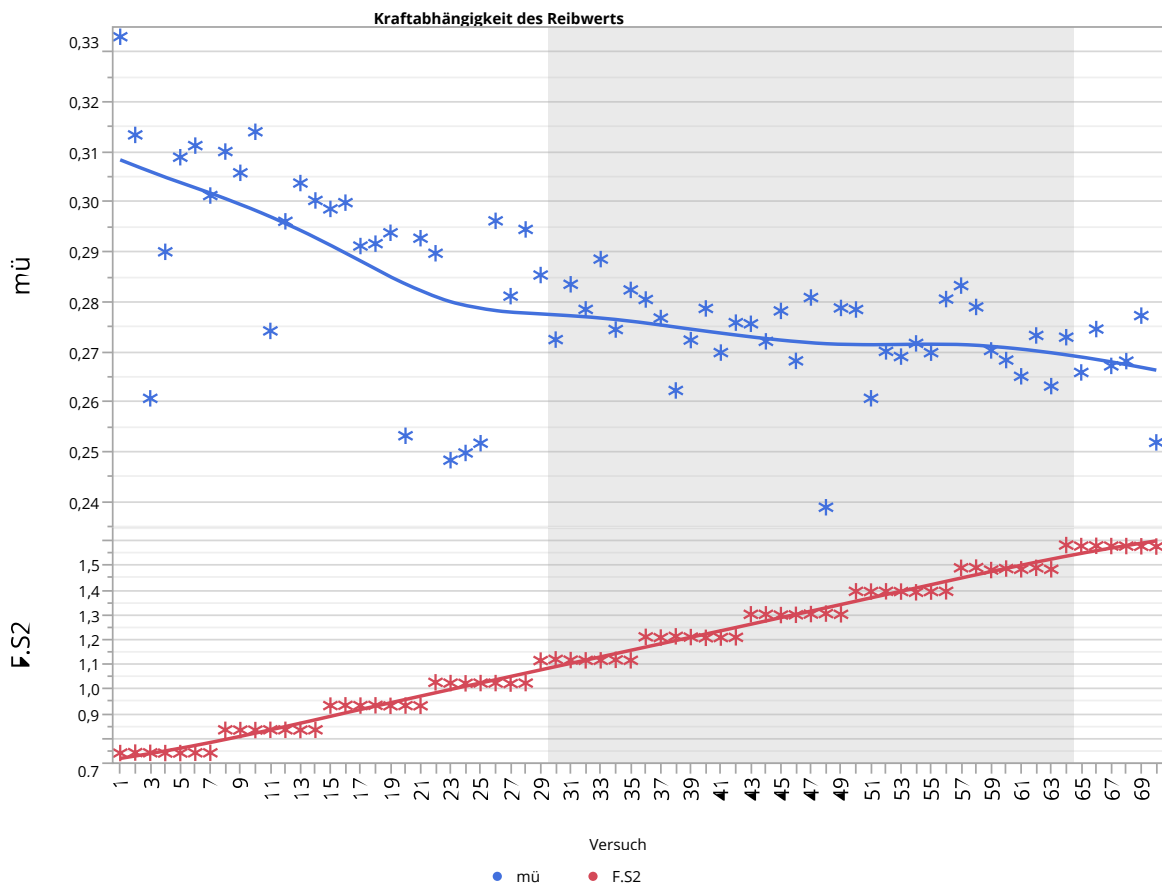


Abbildung 5: Untersuchung der Kraftabhängigkeit des Reibwerts, quasi konstantes Verhalten im grau markierten Bereich

Tabelle 9 listet alle ermittelten Reibwerte für alle Materialpaarungen mit dem Drahtseil Casar Turboplast für alle Stufen von F_{S2} auf. Bei zunehmendem F_{S2} sinkt hier ebenfalls der Reibwert wie bei den Reibwerten mit dem Casar Starlift.

Tabelle 9: Reibwert μ für alle Materialpaarungen mit dem Drahtseil Casar Turboplast

Treibscheibe	Schmierstoff	$F_{S2} = 0,39 \text{ kN}$		$F_{S2} = 0,56 \text{ kN}$		$F_{S2} = 0,74 \text{ kN}$	
		μ	$\Delta\mu$	μ	$\Delta\mu$	μ	$\Delta\mu$
Kunststofffutter	III Star	0,53	0,03	0,51	0,02	0,47	0,02
Tec-Be-Plast	SK-U	0,20	0,09	0,19	0,06	0,15	0,05
gelb	UNOLIT 130	0,19	0,09	0,17	0,06	0,16	0,05
	Werkzustand	0,49	0,03	0,50	0,03	0,49	0,05
Kunststofffutter	III Star	0,57	0,03	0,50	0,02	0,46	0,02
Tec-Be-Plast	SK-U	0,18	0,09	0,16	0,07	0,13	0,05
schwarz	UNOLIT 130	0,13	0,11	0,1	0,08	0,08	0,06
	Werkzustand	0,44	0,06	0,44	0,04	0,43	0,03
Kunststofffutter	III Star	0,51	0,03	0,47	0,02	0,46	0,02
Tec-Be-Plast	SK-U	0,21	0,08	0,19	0,06	0,18	0,05
grün	UNOLIT 130	0,19	0,09	0,16	0,06	0,15	0,05
	Werkzustand	0,52	0,02	0,53	0,03	0,53	0,05
Magnettreibscheibe	III Star	0,30	0,06	0,31	0,05	0,31	0,04
PVD-Arc	SK-U	0,46	0,05	0,40	0,04	0,34	0,04
	UNOLIT 130	0,28	0,06	0,21	0,06	0,18	0,05
	Werkzustand	0,33	0,06	0,33	0,05	0,31	0,04
Magnettreibscheibe	III Star	0,49	0,04	0,45	0,04	0,43	0,04
Wolfram	SK-U	0,50	0,04	0,44	0,04	0,4	0,04
	UNOLIT 130	0,48	0,04	0,45	0,04	0,42	0,04
	Werkzustand	0,48	0,04	0,44	0,04	0,40	0,04
Magnettreibscheibe	III Star	0,36	0,05	0,33	0,05	0,35	0,04
Keramik	SK-U	0,41	0,05	0,39	0,04	0,40	0,04
	UNOLIT 130	0,34	0,05	0,35	0,05	0,35	0,04
	Werkzustand	0,37	0,05	0,34	0,05	0,32	0,04

Tabelle 10 listet alle ermittelten Reibwerte für alle Materialpaarungen mit dem Drahtseil Brugg CTP für alle Stufen von F_{S2} auf. Es fällt auf, dass hier kein abnehmender Reibwert für zunehmende F_{S2} erkennbar ist, was auf den Einfluss der Kunststoffummantelung zurückzuführen ist.

Tabelle 10: Reibwert μ für alle Materialpaarungen mit dem Drahtseil Brugg CTP

Treibscheibe	$F_{S2} = 0,39 \text{ kN}$		$F_{S2} = 0,56 \text{ kN}$		$F_{S2} = 0,74 \text{ kN}$	
	μ	$\Delta\mu$	μ	$\Delta\mu$	μ	$\Delta\mu$
Kunststofffutter Tec-Be-Plast gelb	0,51	0,03	0,46	0,03	0,46	0,02
Kunststofffutter Tec-Be-Plast schwarz	0,46	0,04	0,45	0,02	0,45	0,02
Kunststofffutter Tec-Be-Plast grün	0,68	0,02	0,60	0,02	0,54	0,02
Magnettreibscheibe PVD-Arc	0,39	0,05	0,44	0,04	0,47	0,04
Magnettreibscheibe Wolframcarbid	0,54	0,04	0,54	0,04	0,54	0,03
Magnettreibscheibe Keramik	0,56	0,04	0,60	0,03	0,58	0,03

Aus den Reibwertversuchen geht hervor, dass die Materialpaarung „wolframcarbid-beschichtete Magnettreibscheibe“-„Casar Starlift“-„Werksschmierung“ für die Spulversuche in AP 4 am besten geeignet ist: Es liegt ein Reibwert vor, der über dem Durchschnitt der Versuchsreihe liegt. Ein größerer Reibwert kann grundsätzlich als vorteilhaft angesehen werden, da dieser die notwendige Seilkraft F_{S2} zur Bewicklung der Seiltrommel am Hochleistungstreibsystem reduziert. Infolgedessen verringert sich die Belastung des Hochleistungstreibsystems, was Materialeinsparungen bei der Konstruktion dessen ermöglicht. Diese senken die Produktionskosten des Hochleistungstreibsystems.

Das Drahtseil Casar Starlift wird vom Hersteller für den Betrieb des Referenzsystems empfohlen. Beim Referenzsystem handelt es sich nach AP 1.3 um einen Mobilkran. Zusätzlich werden von Casar die drehungsfreien Drahtseile mit 16 bis 18 Außenlitzen als besonders geeignet für die Verwendung in der Mehrlagenwicklung beworben. Indem in den Spulversuchen ein Drahtseil gewählt wird, das für den Betrieb am Referenzsystem empfohlen wird, kann bezogen auf die Seilkonstruktion die größtmögliche Praxisnähe erreicht werden. Dies ist erstrebenswert, da eine größere Praxisnähe es besser ermöglicht, aus den Versuchsergebnissen aus AP 5, Schlüsse über die Wirksamkeit des Hochleistungstreibsystems beim realen Referenzsystem zu ziehen. Analog zur Auswahl des Drahtseils wird für die Verwendung der Werksschmierung argumentiert. Diese ermöglicht die größte Praxisnähe und wurde deshalb gewählt.

Die wolframcarbid-beschichtete Magnettreibscheibe besitzt gegenüber den anderen getesteten Treibscheiben den Vorteil, dass mit ihr für alle Drahtseile und Schmierstoffe mit geringer Streuung hohe Reibwerte erzielt werden. Abbildung 6 und Abbildung 7 verdeutlichen dies, indem Boxplots verschiedener Materialpaarungen nach den verschiedenen Treibscheiben geordnet dargestellt sind. Es ist deutlich zu erkennen, dass die Streuung zwischen den Reibwerten der Materialpaarungen mit der wolframcarbid-beschichteten Magnettreibscheibe geringer ausfällt als für die anderen Treibscheiben. Dies ist für die Tauglichkeit des Hochleistungstreibsystems in der Praxis von Nutzen, da dieses so mit vielen verschiedenen Kombinationen von Drahtseilen und Schmierstoffen ohne weitere Anpassungen kompatibel ist. Eine große Schwankung des Reibwerts zwischen verschiedenen Kombinationen würde bedeuten, dass für manche Kombinationen kein Abrollen auf der Treibscheibe und somit kein

ordnungsgemäßer Betrieb des Hochleistungstreibsystems gewährleistet wäre. Die anderen Anwendungsparameter müssten deshalb für unterschiedliche Materialkombinationen anpassbar sein, was zusätzlichen Aufwand ohne Mehrwert bedeutet.

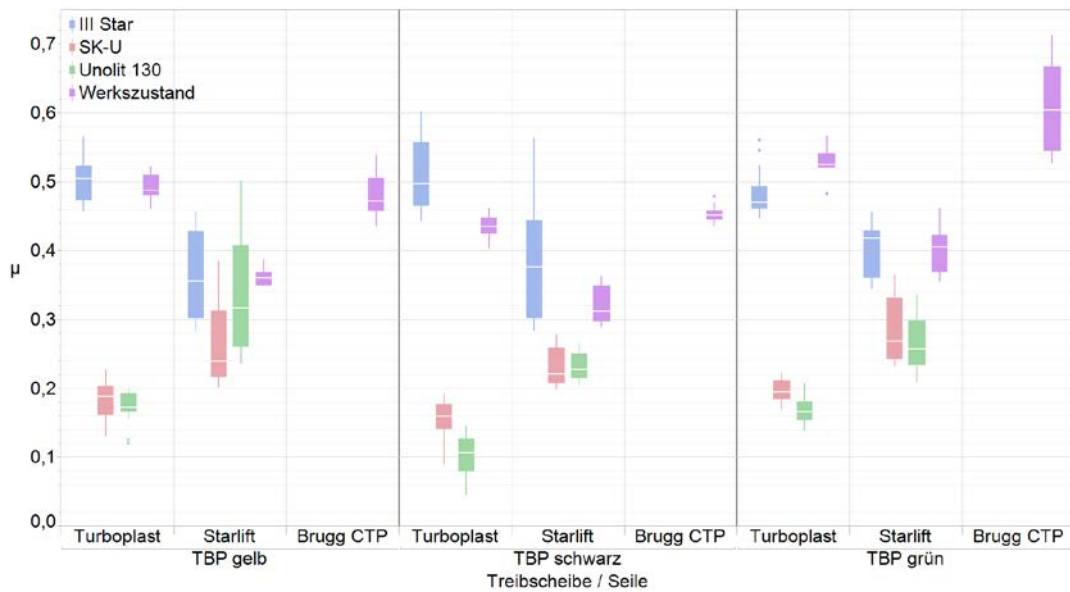


Abbildung 6: Boxplots der Reibwerte der Materialpaarungen mit den Kunststofftreibscheibenfuttern

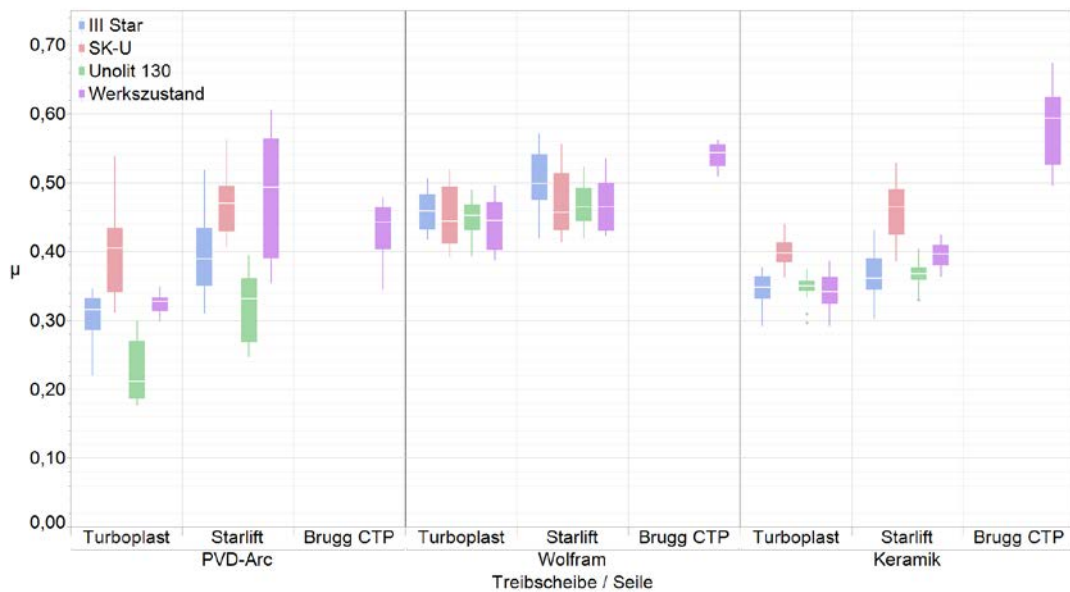


Abbildung 7: Boxplots der Reibwerte der Materialpaarungen mit den Magnettreibscheiben

AP 4 Performancetest des Hochleistungstreibsystems im Labor

Mit der in AP 3 ausgewählten Materialpaarung wurde das Hochleistungstreibsystem am Windenprüfstand der Forschungsstelle experimentell untersucht. Dies diente dem Zweck festzustellen, inwiefern sich das Hochleistungstreibsystem auf die Betriebs- und Lebensdauer des Drahtseils auswirkt. Nachfolgend wird die Anpassung des Windenprüfstands für die geplanten Versuche und die Versuchsplanung erläutert.

AP 4.1 Anpassung des Windenprüfstands

Für die Spulversuche wurde ein Prüfstand zur automatischen Auf- und Abwicklung eines mehrlagigen Wickelpakets entwickelt und gebaut. Das Prinzip des Seilverlaufs am Prüfstand ist in Abbildung 9a zu sehen. Von der mehrlagig bewickelten Seiltrommel (nachfolgend „Prüftrommel“) verläuft das Seil über eine Umlenkrolle zur Magnettreibscheibe und über zwei weitere Umlenkrollen zur einlagig bewickelten zweiten Seiltrommel (nachfolgend „Lasttrommel“). Prüftrommel und Magnettreibscheibe stellen das zu testende Hochleistungstreibsystem dar. Die dazwischenliegende Umlenkrolle dient dazu, den Ablenkwinkel zur Prüftrommel zu verringern und das Seil gerade auf die Magnettreibscheibe auflaufen zu lassen. Weiterhin ist die Prüftrommel mit Halbschalen in Funktionsrillung des Herstellers Lebus versehen, die die Seillagen in Parallel- und Kreuzungsbereiche teilt. Diese soll den Aufbau des homogenen Wickelpakets unterstützen. Zwei weitere Umlenkrollen sind notwendig, um das Seil gerade von der Magnettreibscheibe ablaufen zu lassen, den Umschlingungswinkel auf 150° zu erhöhen sowie die Führung des Seils auf die Lasttrommel zu realisieren. Die Lasttrommel dient dazu, eine variierende Belastung zu erzeugen, mit der das Seil von der Prüftrommel abgewickelt bzw. auf sie aufgewickelt wird. Abbildung 9b zeigt den realen Prüfstand im Versuchsfeld der Forschungsstelle, an dem der Demonstrator des Hochleistungstreibsystems montiert ist (Abbildung 8).

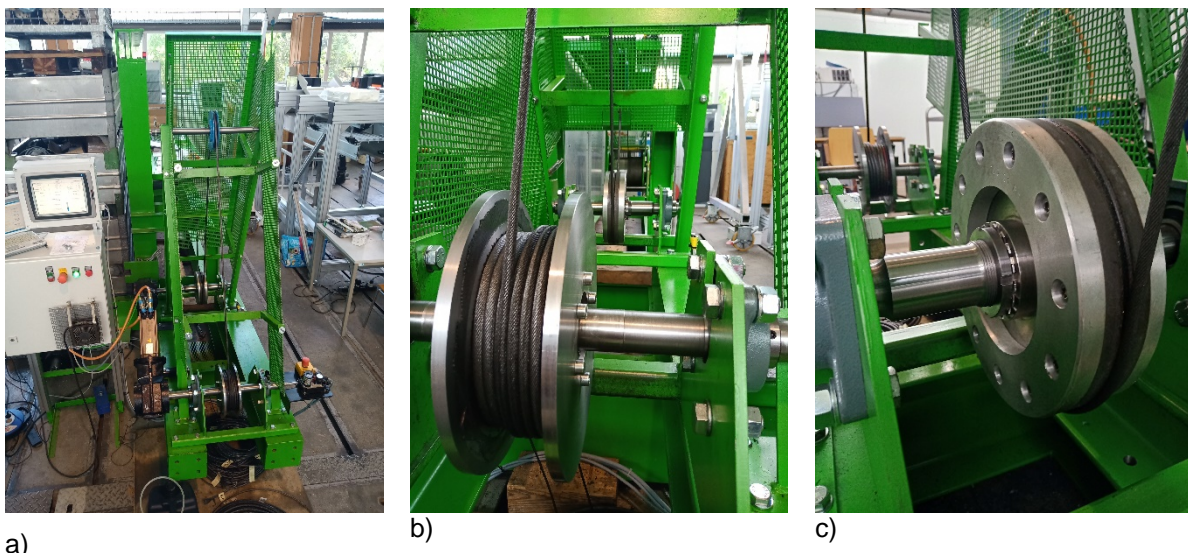
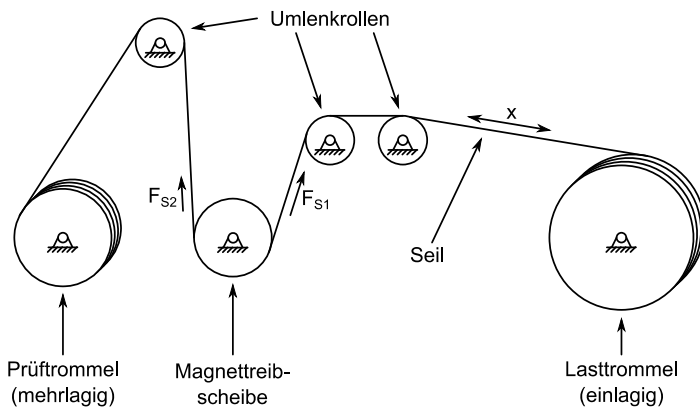


Abbildung 8: Demonstrator des Hochleistungstreibsystems, a) Gesamtansicht, b) Trommelseite, c) Treibscheibenseite

Für die Seilkraftregulierung ist am Prüfstand eine Drehmoment-Drehzahl-Regelung implementiert. Während der Antrieb der Magnettreibscheibe drehzahlregelt die Fördergeschwindigkeit und -richtung vorgibt, reguliert der drehmomentgeregelte Antrieb der Prüftrommel die Seilkraft F_{S2} , mit der das Seil auf die Prüftrommel aufläuft bzw. von ihr abläuft. Die Lasttrommel wird ebenfalls drehmomentgeregelt angetrieben, um die notwendige Prüflast, die durch die Seilkraft F_{S1} nachgebildet wird, aufzubringen. Beim Auf- und Abwickeln können unterschiedliche Werte vorgegeben werden, um Schwankungen für F_{S1} nachzubilden, wie sie etwa durch An- und Abhängen der Last am Kranhaken auftreten. Ein Lastspiel umfasst das Auf- und Abwickeln der festgelegten Seillänge und führt beim gespulten Seilstück zu zehn Biegewechseln.



a)

b)

Abbildung 9: Prüfstand für Spulversuche, a) schematischer Aufbau, b) realer Prüfstand

Zur Durchführung von Kontrollversuchen ohne die Seilkraftregulierung des Hochleistungstreibsystems ist es weiterhin möglich, die Magnettreibscheibe nicht anzutreiben und somit 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.

AP 4.2 Abbildung anwendungsrelevanter Szenarien am Windenprüfstand

Für die Spulversuche wurde der in Tabelle 2 dargestellte Versuchsplan ausgearbeitet. Dieser besteht aus acht Versuchsdurchläufen mit den drei Parametern Antrieb geregelt/ungeregelt, F_{S1} und F_{S2} zu je zwei Stufen: Der (De-)Aktivierung der Seilkraftregulierung sowie der Wahl der Werte für F_{S1} beim Auf- und Abwickeln (bezogen auf die Prüftrommel). Mit 1 kN und 4 kN wurden hier ca. 2% und 8% der Mindestbruchkraft des verwendeten Drahtseils gewählt. Die untere Grenze von F_{S1} zu 2% der Mindestbruchkraft 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 [21]. Die obere Grenze für F_{S1} zu 8% der Mindestbruchkraft orientiert sich an den Möglichkeiten der Versuchsumgebung und bildet eine übliche Traglast ab. Ziel der Variation von F_{S1} beim Auf- und Abwickeln in den Kontrollversuchen ist die gezielte Erzeugung von ungleichen Spannungszuständen im Seil auf der mehrlagig bewickelten Prüftrommel im Betrieb ohne Seilkraftregulierung. Im Betrieb mit der neuartigen Seilkraftregulierung sollen diese ungleichen Spannungszustände vermieden werden, indem die Seilkraftregulierung F_{S2} konstant bei 2 kN hält. Dies soll im Vergleich mit dem Kontrollversuch den positiven Effekt auf die Seillebensdauer nachweisen. F_{S2} beträgt 25% der maximalen Last von $F_{S1} = 4 \text{ kN}$ und liegt damit über dem vom Hersteller der Funktionsrillung geforderten Minimum von 10%.

Die während der Versuche nicht veränderten Parameter sind ebenfalls in Tabelle 2 angegeben. Im Ergebnis der Reibwertersuche aus AP 3 fiel die Wahl auf die wolframcarbid-beschichtete

Magnettreibscheibe und das Drahtseil Casar Starlift mit Werksschmierung. Mit dieser Materialkombination wird ein hoher Reibwert von $\mu = 0,43 \pm 0,04$ erreicht, der außerdem eine geringe Streuung aufweist. Für die Durchführung der Spulversuche wurde die Festlegung getroffen, von der obersten sechsten Lage bis auf inklusive Lage drei auf- und abzuwickeln. Es ergeben sich vier bewegte Lagen und mit der zweiten Lage eine Totlage, die zusätzlich auf Schädigungen untersucht werden kann. Die erste Lage, die das Seil in der Funktionsrillung führt, ist nicht Gegenstand der Untersuchungen. Bei der installierten Leistung der verwendeten Antriebe und den gewählten Seilkräften F_{S1} und F_{S2} ergibt sich eine Fördergeschwindigkeit von 3,6 m/min.

Zur Überprüfung des Seilverschleißes soll eine Drahtbruchzählung nach DIN ISO 4309 durchgeführt werden [22]. Das Abbruchkriterium für einen Versuchsdurchlauf ist das Erreichen der Ablegereife aufgrund der sichtbaren Drahtbrüche. Aufgrund der optischen Überprüfung der Drahtseile entfällt eine Prüfmittelanalyse wie für die Reibwertversuche.

Tabelle 11 zeigt den Versuchsplan, der für die Versuchsreihe vorbereitet wurde. Die Dauer eines Spulversuchs ist erwartungsgemäß groß und steigt für die geplanten Versuche weiter an, da vier Seillagen zu insgesamt 18 m Drahtseil auf- und abgewickelt werden. In der verfügbaren Zeit wurden acht Versuche als realistisch angesehen, weshalb entschieden wurde, nur den Effekt der Seilkraftregelung zu untersuchen. Dazu enthält der Versuchsplan zwei Faktoreinstellungen – mit Seilkraftregelung und ohne – und jeweils vier Wiederholungen. Alle anderen Faktoren wurden als konstant angesetzt, damit mit den möglichen Versuchen die maximale Aussagekraft hinsichtlich des Effekts der Seilkraftregelung auf die Betriebs- und Lebensdauer des Drahtseils erreicht wird.

Tabelle 12 zeigt den tatsächlich umgesetzten Versuchsplan, der Anpassungen während des Versuchsbetriebs dokumentiert. Da die Steigerung der Betriebs- und Lebensdauer der Drahtseile die Erwartungen überstieg, erhöhte sich die Versuchsdauer der Durchläufe mit Seilkraftregelung. Deshalb wurden insgesamt sechs Versuche durchgeführt. Weiterhin wurde Durchlauf vier mit einem Seil in Kreuzschlag durchgeführt. Nachdem in Versuch zwei und drei eine vergleichsweise geringe Streuung festgestellt werden konnte, wurde die verbleibende Zeit für Durchläufe mit Seilkraftregelung genutzt. Die Auswertung der Versuchsreihe in AP 5 zeigt, dass mit den Anpassungen die gesetzten Forschungsziele erreicht werden konnten.

Tabelle 11: Vorbereiteter Versuchsplan für die Spulversuche

Durchlauf	Regelung	Konstante Faktoren
1	ja	Drahtseil: 8 16x7-WSC 1960 U zZ Casar Starlift
2	nein	Treibscheibe: Magnettreibscheibe wolframcarbid-beschichtet
3	ja	Schmierstoff: Werkstoffzustand
4	nein	auf-/abzuwickelnde Seillagen: 3 bis 6
5	ja	Fördergeschwindigkeit: 3,6 m/min
6	nein	Seilkraft F_{S2} bei aktiver Regelung: 2 kN
7	ja	Seilkraft F_{S1} beim Aufwickeln: 1 kN
8	nein	Seilkraft F_{S1} beim Abwickeln: 4 kN

Tabelle 12: Tatsächlich umgesetzter Versuchsplan

Durchl auf	Regelung	Schlagrichtung	Konstante Faktoren
1	ja	zZ	Drahtseil: 8 16x7-WSC 1960 U Casar Starlift
2	nein	zZ	Treibscheibe: Magnettreibscheibe wolframcarbid-beschichtet
3	nein	zZ	Schmierstoff: Werkszustand
4	ja	sZ	auf-/abzuwickelnde Seillagen: 3 bis 6
5	ja	zZ	Fördergeschwindigkeit: 3,6 m/min
6	ja	zZ	Seilkraft F_{S2} bei aktiver Regelung: 2 kN

AP 5 Bewertung der Seilschädigung

Um den positiven Effekt des Hochleistungstreibsystems auf die Seillebensdauer von Drahtseilen bei der mehrlagigen Bewicklung nachzuweisen, wurde die Seilschädigung der geprüften Drahtseile bewertet.

AP 5.1 Analyse des Seils auf Verschleißerscheinungen, Drahtbruchzählung

Abbildung 10 zeigt die Betriebs- und Lebensdauer, die die Drahtseile in den unterschiedlichen Versuchsdurchläufen erreicht haben. Sowohl Betriebs-, als auch Lebensdauer steigen durch den Einsatz der Seilkraftregelung (blau) gegenüber den Kontrollversuchen (rot) signifikant, im arithmetischen Mittel um 71% (Betriebsdauer) und 39% (Lebensdauer). Die Versuchsergebnisse lassen darauf schließen, dass die Seilkraftregelung des Hochleistungstreibsystems dazu führt, dass die Lebensdauer des Drahtseils nicht nur steigt, sondern auch besser ausgenutzt wird. Zu erkennen ist dies an der Tatsache, dass die Betriebsdauer stärker ansteigt als die Lebensdauer. Für die Praxis ist diese Erkenntnis relevant, da das Maschinenelement Drahtseil folglich in zweierlei Hinsicht wirtschaftlicher betrieben werden kann. Die gesteigerte Lebensdauer des Drahtseils überlagert sich mit einer weiteren Steigerung der Betriebsdauer, was die beobachtete überproportionale Steigerung letzterer ergibt.

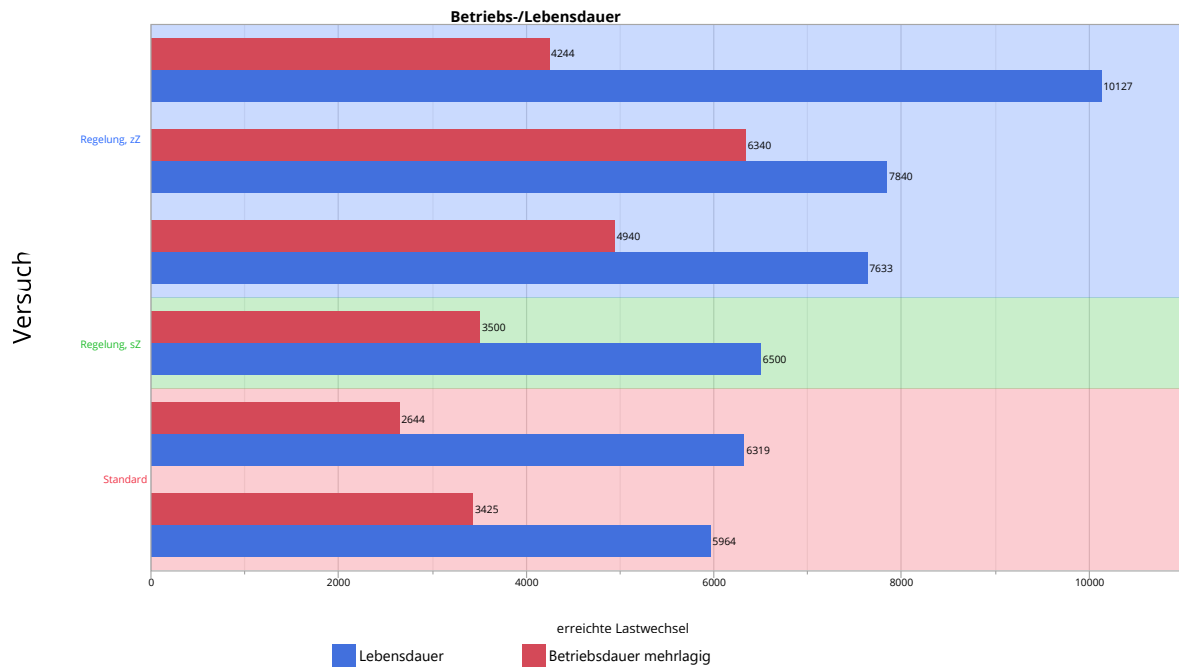


Abbildung 10: Betriebs- und Lebensdauer jedes Versuchs

Der Versuch mit einem Drahtseil gleicher Konstruktion, das sich lediglich durch die Verseilung der Litzen in Kreuzschlag unterscheidet, weist ein ähnliches Ermüdungsverhalten wie die Kontrollversuche auf (+15/6% Betriebs-/Lebensdauer). Da im Kreuzschlag verseilte Litzen auf mehrlagig wickelnden Seiltrommeln grundsätzlich nachteilig sind, müsste das getestete Drahtseil jedoch ein deutlich schnelleres Ermüdungsverhalten aufweisen. Dies deutet ein eindrucksvolles Verbesserungspotenzial durch das Hochleistungstreibsystem in anderen Anwendungsfällen an. Da der zeitliche Rahmen des Forschungsvorhabens keine Wiederholung dieses Versuchsdurchlaufs zuließ, dient dessen Ergebnis nur einem ersten Screening weiterer Anwendungsmöglichkeiten.

Über den Versuchszeitraum wurden sechs Versuchsdurchläufe durchgeführt, die jeweils mehrere Wochen andauerten, wodurch sich der Versuchsbetrieb in Summe über 43 Wochen erstreckte. Die geringe Anzahl an möglichen Versuchsdurchläufen, die der langen Dauer eines Durchlaufs geschuldet ist, gestaltet die statistische Bewertung einer Versuchsreihe in der Seilforschung üblicherweise schwierig. Tabelle 13 listet einige statistische Kenndaten der durchgeführten Versuchsreihe auf. Dabei fällt auf, dass der Standardfehler für die Kontrollversuche und die Versuche mit Seilkraftregelung bei relativer Betrachtung ähnlich ausfällt. Der Unterschied im Absolutwert erklärt sich durch die geringere mittlere Betriebsdauer der Kontrollversuche. 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. Besonders da es sich beim Hochleistungstreibsystem um ein neuartiges Hubwerk handelt, zu dessen Wirkung auf das Drahtseil noch keine weiteren Kenntnisse existieren.

Tabelle 13: Statistische Kennzahlen der Dauerspülversuche

Größe	Statistische Kennzahl	Kontrollversuch	Seilkraftregelung
Betriebsdauer	Arithmetisches Mittel	3035	5175

	Standardfehler	391	616
	Relativer Standardfehler	13%	12%
	Ergebnis (95% Konfidenzintervall)	3035±766	5175±1207
Lebensdauer	Arithmetisches Mittel	6142	8533
	Standardfehler	178	799
	Relativer Fehler	3%	9%
	Ergebnis (95% Konfidenzintervall)	6142±349	8533±1566

Abbildung 11 zeigt die Drahtbruchentwicklung, die jedes Drahtseil im Versuchsdurchlauf erfahren hat. Es lässt sich feststellen, dass das Drahtseil mit dem Hochleistungstreibsystem eine signifikant höhere Anzahl an Drahtbrüchen erfährt, bis es zum Seilversagen kommt. Dies zeigt, dass das Drahtseil mit dem Hochleistungstreibsystem 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.

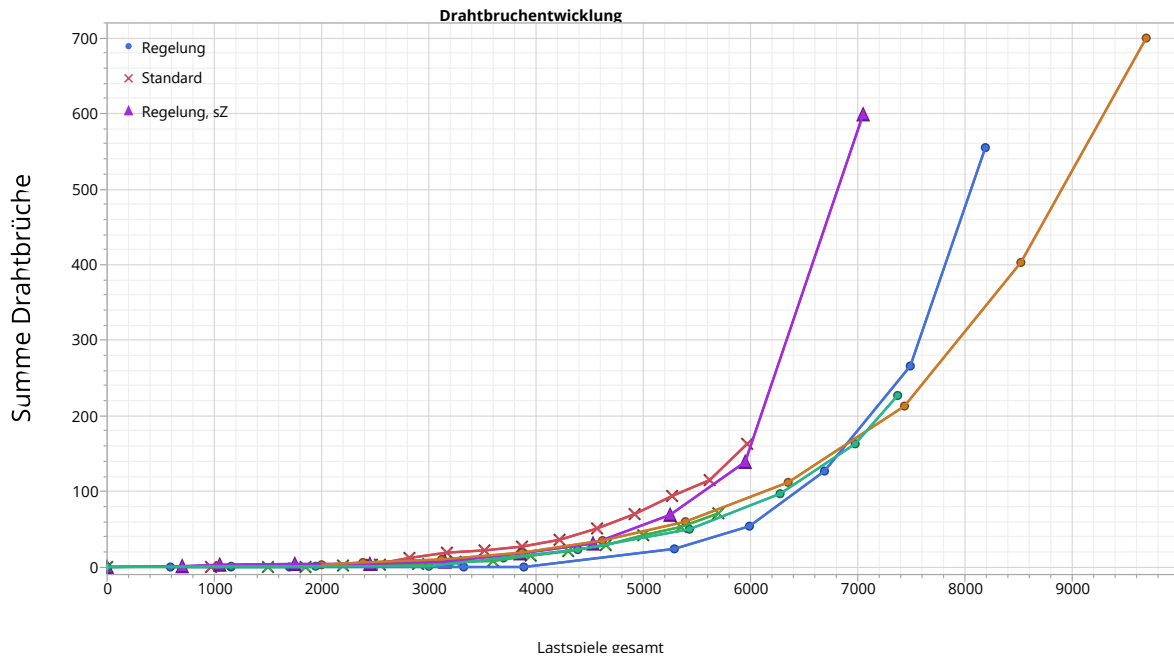


Abbildung 11: Drahtbruchentwicklung je Versuch über der Anzahl der durchlaufenen Lastspiele

Abbildung 12 stellt den Scheitelpunkt der Exponentialkurven aus Abbildung 11 dar. Es ist zu erkennen, 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.

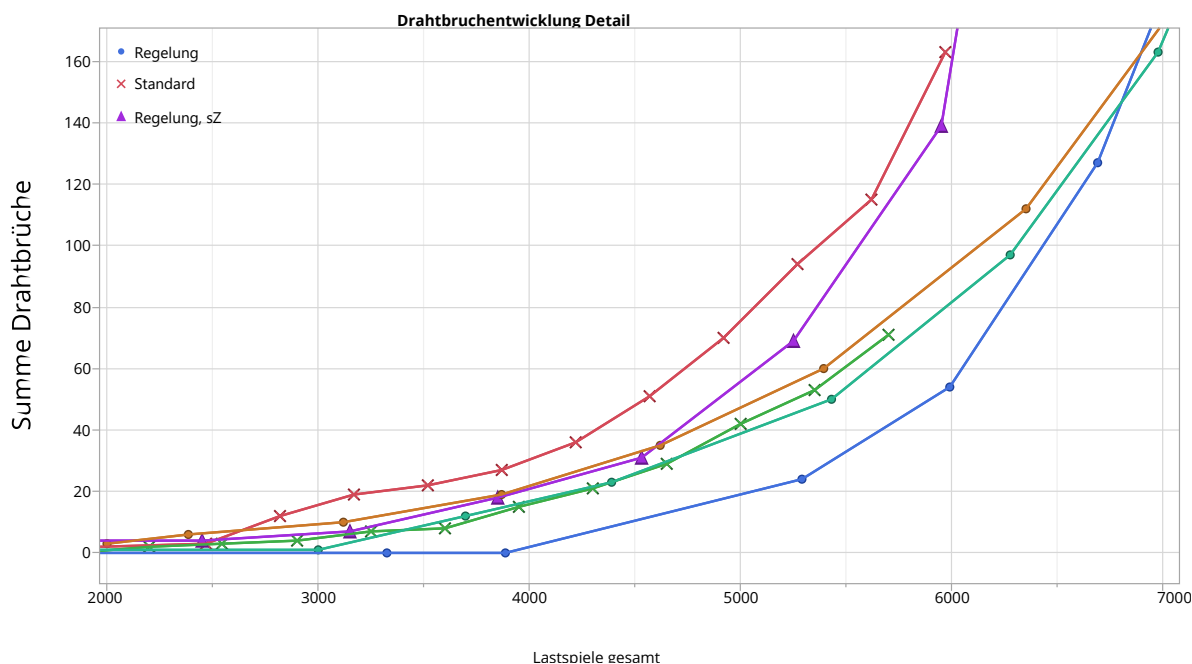


Abbildung 12: Detailansicht des Scheitelpunkts der Drahtbruchentwicklung aus Abbildung 11

Abbildung 13 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 Hochleistungstreibsystem steigt, da die unteren Lagen auf mehrlagig wickelnden Seiltrommeln besonders beansprucht werden. Für die oberste ungespulte Lage zwei kann aus den Versuchsdaten kein Effekt des Hochleistungstreibsystems abgeleitet werden.

Im projektbegleitenden Ausschuss wurde diskutiert, welche Grenzwerte für die Ablegereifeerkennung von Drahtseilen nach [22] verwendet werden sollten. Da sich das Ermüdungsverhalten durch den Betrieb mit dem Hochleistungstreibsystem potenziell ändern kann, wurde diskutiert, ob anstatt dem Grenzwert sichtbarer Außendrahtbrüche für mehrlagig wickelnde Seiltrommeln, der für eine zufällige Verteilung der Drahtbrüche (mit Seilscheiben und einlagig wickelnden Seiltrommeln) verwendet werden sollte. Abbildung 14 zeigt dafür die Aufstellung der Betriebs- und Lebensdauern der einzelnen Versuche, ergänzt um die festgestellte Betriebsdauer für eine angenommene zufällige Verteilung der Drahtbrüche. Es ist zu sehen, dass sich die Betriebsdauer für die Versuche mit Regelung reduziert. Da sich die Drahtbruchentwicklung durch die Seilkraftregelung signifikant verlangsamt, erscheint es plausibel, dass sich die Lastspielzahl zwischen dem Eintreten der Ablegereife für beide Grenzwerte vergrößert. Für die Kontrollversuche ist kein Effekt zu erkennen, jedoch befindet sich der Unterschied zwischen den beiden Betriebsdauern hier auf dem Niveau des ermittelten Standardfehlers. Somit kann keine Aussage getroffen werden, ob bei den Kontrollversuchen dieselbe Abhängigkeit auftritt.

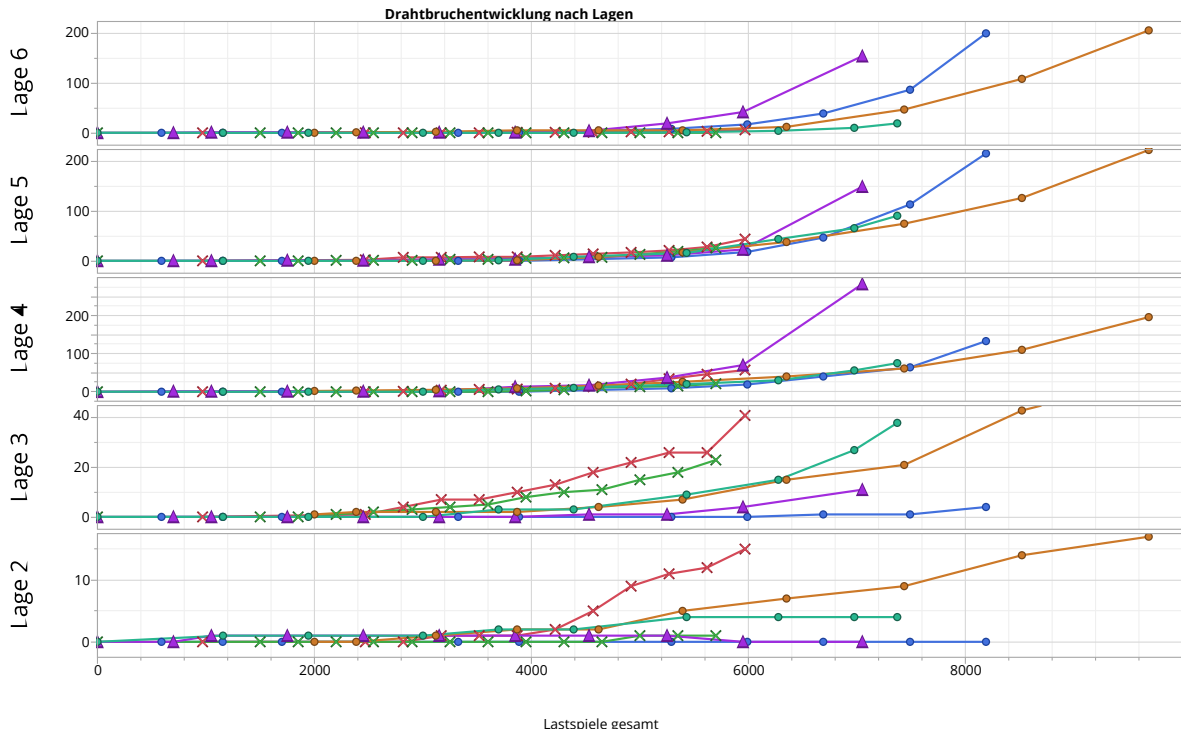


Abbildung 13: Drahtbruchentwicklung je Versuch über der Anzahl der durchlaufenen Lastspiele, getrennt nach Seillage

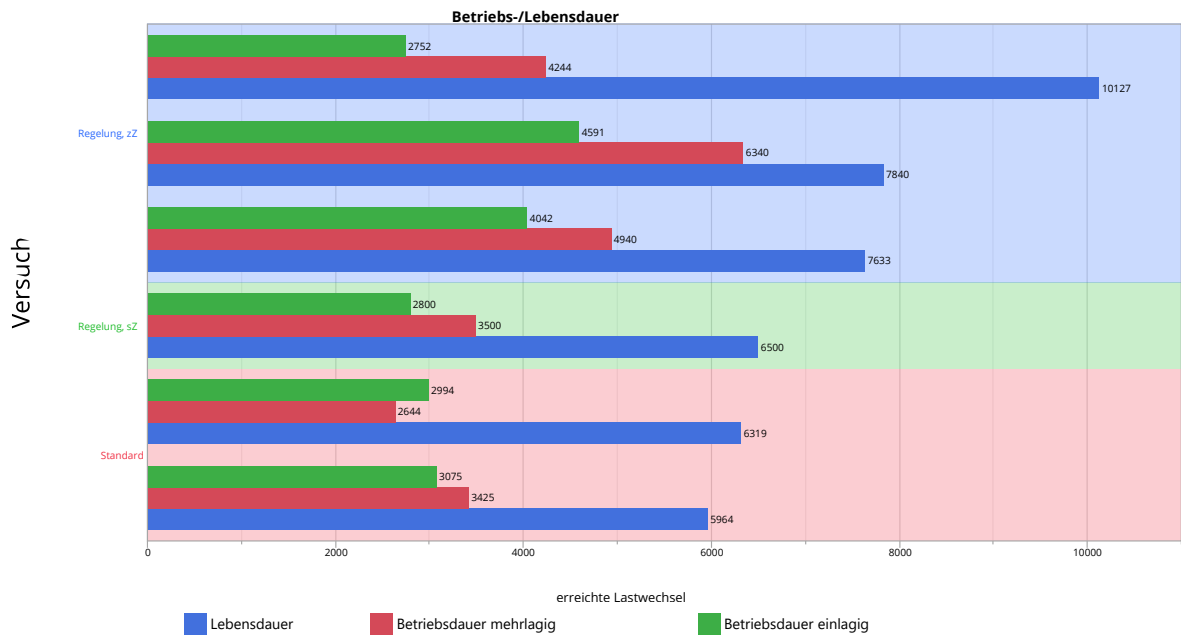


Abbildung 14: Betriebs- und Lebensdauer der einzelnen Versuche mit zusätzlicher Betriebsdauer für eine angenommene zufällige Verteilung der Drahtbrüche

Um dennoch eine Empfehlung zur Ablegereifebestimmung zu erhalten, wurden die inneren Drahtbrüche der abgelegten Drahtseile untersucht. Tabelle 14 zeigt die Anzahl der Drahtbrüche, die Seilstücke nach Erreichen der Lebensdauer auf der Oberfläche des Kerns aufweisen. Dazu wurden aus allen untersuchten Lagen Seilstücke von etwa 50 cm Länge geöffnet und manuell untersucht. Hierbei fand sich kein Unterschied in der Anzahl der festgestellten Drahtbrüche. Dies lässt den Schluss zu, dass das Ermüdungsverhalten des

Seilkerns im selben Verhältnis zur erreichten Lebensdauer steht. Deshalb liegt es auf Basis der aktuellen Forschungsergebnisse nahe, zur Bestimmung der Ablegereife für seilkraftgeregelter Hubwerke wie das Hochleistungstreibsystem weiterhin die Anzahl an zulässigen Drahtbrüchen für mehrlagig wickelnde Seiltrommeln zu verwenden.

Tabelle 14: Anzahl der innenliegenden Drahtbrüche im Vergleich

Lage	Versuch	Anzahl Drahtbrüche Kern
6	Regelung	55
	Kontrolle	53
5	Regelung	64
	Kontrolle	64
4	Regelung	3
	Kontrolle	1
3	Regelung	0
	Kontrolle	0
2 (ungespult)	Regelung	0
	Kontrolle	0

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die durchgeführten Spulversuche bewiesen haben, dass die Seilkraftregelung des Hochleistungstreibsystems einen signifikanten positiven Effekt auf die Betriebs- und Lebensdauer des verwendeten Drahtseils besitzt. Dieser begründet sich einerseits in der langsameren Drahtbruchentwicklung, andererseits in der gleichmäßigeren Verteilung der Drahtbrüche im Wickelpaket. Besonders tiefer liegende Lagen erfahren geringere Beanspruchung. Dennoch wird angemerkt, dass die erzielten Ergebnisse unter Versuchsbedingungen und mit einer Faktoreinstellung durchgeführt wurden, was dem hohen Zeitaufwand bei der experimentellen Analyse von Drahtseilen geschuldet ist. Eine Übertragbarkeit der Ergebnisse auf ähnliche Faktoreinstellungen erscheint zum jetzigen Zeitpunkt plausibel, kann jedoch nicht gewährleistet werden und sollte demzufolge Gegenstand weiterer Untersuchungen sein.

AP 6 Aufbereitung von Berechnungsgrundlagen zur Auslegung

Für den Einsatz seilkraftregelnder Hubwerke in der Krantechnik sind allgemeine Gestaltungsregeln sowie Berechnungsgrundlagen zur Dimensionierung und Richtlinien sowie ein grundsätzliches Verständnis der vorherrschenden Lastverteilung von großer Bedeutung.

AP 6.1 Theoretische Betrachtung zur Lastverteilung im Seiltrieb

Das Hochleistungstreibsystem zur Seilkraftregulierung 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 Motor angetrieben. Während über den Antrieb der Treibscheibe die Fördergeschwindigkeit des Hochleistungstreibsystems geregelt wird, dient der Antrieb der Seiltrommel der kontinuierlichen Seilkraftregulierung. Abbildung 15a zeigt den grundlegenden Aufbau des Hochleistungstreibsystems. Als Treibscheibe kommt aufgrund ihrer überlegenen Treibfähigkeit eine Magnettreibscheibe, die bereits an der Professur für Technische Logistik untersucht wurde, zum Einsatz [23, 24]. 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 Seillängskräfte sind in Abbildung 15b dargestellt.

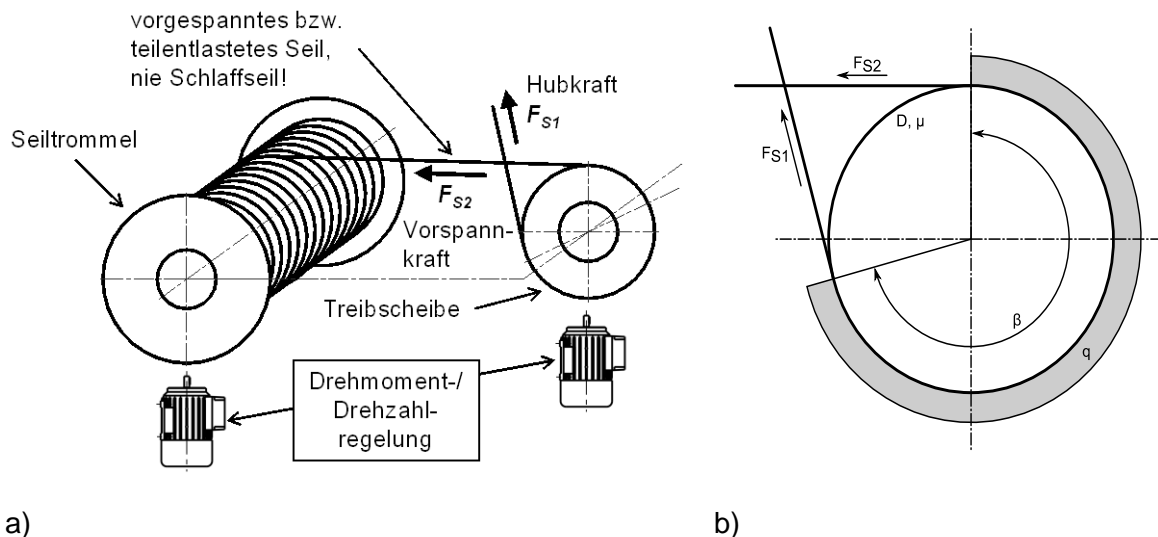


Abbildung 15: Hochleistungstreibsystem zur Seilkraftregulierung, a) Funktionsweise, b) Kräfte an der Magnettreibscheibe

- D Treibscheibennendurchmesser 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

Für herkömmliche Treibscheiben ohne zusätzliche Magnetkraft ergibt sich die Seilreibung mit der Euler-Eytelwein-Gleichung [25] zu

$$\frac{F_{S1}}{F_{S2}} = e^{\mu\beta} \tag{5}$$

Unter Verwendung der um die zusätzliche Magnetkraft erweiterten Euler-Eytelwein-Gleichung [24] ergeben sie die Seilkräfte an der Magnettreibscheibe zu

$$\frac{F_{S1}}{F_{S2}} = e^{\mu\beta} + \frac{q \cdot \frac{D}{2} \cdot (e^{\mu\beta} - 1)}{F_{S2}} \tag{6}$$

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 mit konstanter Seilkraft zu bewickeln – unabhängig von der Hublast. 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 Ausführung 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 das

unterschreitende D/d -Verhältnis begrenzt. Der Reibwert μ wird durch die eingesetzte Materialpaarung Seil/Treibscheibenrille 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.

AP 6.2 Berechnungsgrundlagen für Gestaltung, Dimensionierung und Betrieb

Damit seilkraftregelnde Hubwerke wie das Hochleistungstreibsystem von KMU in kommenden Produkten eingesetzt werden können, sind Grundlagen zur Entwicklung und zum Betrieb notwendig. Nachfolgend sind die Berechnungsgrundlagen aufgeführt, die aus den gewonnenen Erkenntnissen abgeleitet werden können.

Damit gewährleistet ist, dass das Drahtseil ohne Rutschen über die Treibscheibe läuft, ist die Lastverteilung aus AP 6.1 zu beachten. Diese gibt die minimale Seilvorspannkraft F_{S2} vor, die nicht unterschritten werden sollte. Zusätzlich soll die empfohlene Seilvorspannkraft nicht die üblichen Herstellerangaben unterschreiten, die ein ordnungsgemäßes Wickelverhalten gewährleisten sollen. Für mehrlagige Seiltrommeln mit Funktionsrillung beträgt diese 2% der Mindestbruchkraft des Drahtseils oder 10% der maximalen Traglast [21]. Da die Traglast durch die Seilkraftregelung von der Seilvorspannkraft, mit der die Seiltrommel bewickelt wird, getrennt wird, empfiehlt sich für seilkraftregelnde Hubwerke das Kriterium von 2% der Mindestbruchkraft des Drahtseils.

Die minimale Seilvorspannkraft ist im nächsten Schritt eine Eingangsgröße zur Dimensionierung der Treibscheibe. Über die Variation der Parameter Treibscheibendurchmesser, Haftreibwert (Materialpaarung), Umschlingungswinkel und der Entscheidung für eine konventionelle oder magnetische Treibscheibe garantiert, dass das Drahtseil selbst bei minimaler Traglast (Eigengewicht des Drahtseils und des Kranhakens) nicht über die Treibscheibe rutscht. Die Zusammenhänge sind in AP 6.1 dargestellt, während Abbildung 16 eine darauf basierende Berechnungsvorlage zeigt. In dieser können die relevanten Parameter variiert werden, um die resultierenden Werte zu prüfen und gegebenenfalls anzupassen.

Außerdem wurde bei der Auswertung der Reibwertversuche aus AP 3 ein Analysetool zur Bewertung verschiedener Reibpaarungen erstellt (Abbildung 17). Mit diesem können die Messdaten von durchgeführten Reibwertversuchen interpoliert werden, um einen idealisierten Reibwertverlauf zu erhalten, mit dem das Verhalten der Materialpaarung charakterisiert werden kann.

Berechnungsprogramm HiTracWinch

Berechnungsprogramm zur Auslegung seilkraftregelnder Hubwerke

Bitte Werte eingeben und auf Berechnen klicken.

Berechnung Nr. 1
 Eingegebene Werte
 Nutzlast: 10000 N
 Seilennendurchmesser in m: 0,012 m
 Treibscheibennendurchmesser in m: 0,3 m
 Trommeldurchmesser in der ersten Seilage in m: 0,24 m
 Anzahl der Seilagen: 6
 magnetische Linienlast in N/m: 13000 N/m
 Reibwert: 0,3
 Offsetwinkel Seileinlauf Seiltrommel im Bogenmaß: 0,698
 Umschlingungswinkel Treibscheibe im Bogenmaß: 2,531
 Offsetwinkel Seileinlauf Seiltrommel im Bogenmaß: 0,175
 Sicherheit gegen Rutschen: 1,5
 Geometrische Kenndaten
 D/d-Verhältnis Treibscheibe: 25
 minimales D/d-Verhältnis auf der Seiltrommel in erster Seilage: 20
 minimale Seilvorspannkraft: 3642,52720196027 N
 durch Sicherheit gegen Rutschen gewählte Seilvorspannkraft: 5463,79080294041 N
 Trommeldurchmesser in letzter Seilage: 0,36 m

Belastung der Treibscheibenwelle
 Wellenlast in x-Richtung: 4893,68264644419 N
 Wellenlast in y-Richtung: 4046,51581448776 N
 Wellenlast resultierend: 6349,99370716291 N
 Nenn Drehmoment: 1500 Nm

Belastung der Trommelwelle
 Wellenlast in x-Richtung: 4185,96908736927 N
 Wellenlast in y-Richtung: 3511,50576503658 N
 Wellenlast resultierend: 5463,79080294041 N
 Nenn Drehmoment: 983,482344529274 Nm

10000 Traglast F.N in N
 0,012 Seilennendurchmesser d in m
 0,3 Treibscheibennendurchmesser D.TS in m
 0,24 Trommeldurchmesser erste Seilage D.TRI in m
 6 Anzahl der Seilagen z
 13000 magnetische Linienlast q in N/m
 0,3 Reibwert mü
 0,698 Offsetwinkel alpha Seileinlauf Seiltrommel im Bogenmaß
 2,531 Umschlingungswinkel beta Treibscheibe im Bogenmaß
 0,175 Offsetwinkel gamma Seileinlauf Treibscheibe im Bogenmaß
 1,5 Sicherheit S.R gegen Rutschen

Berechnen Speichern

Abbildung 16: Berechnungsvorlage zur Auslegung seilkraftregelnder Hubwerke

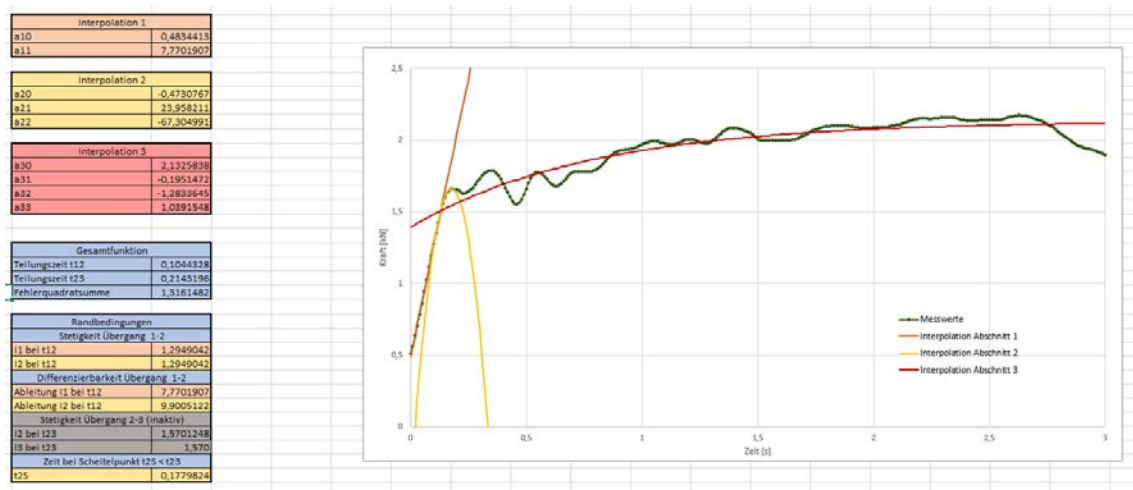


Abbildung 17: Analysetool zur Bewertung unterschiedlicher Reibpaarungen

AP 7 Erarbeitung eines Steuerungskonzepts

Grundlage für einen sicheren, störungsfreien und wirtschaftlichen Betrieb des Hochleistungstreibsystems bildet eine präzise aufeinander abgestimmte Steuerung einzelner Aktuatoren. Demzufolge wurde ein Steuerungskonzept entwickelt, das die Anforderungen des Hochleistungstreibsystems berücksichtigt. Dieses Steuerungskonzept wird nachfolgend erläutert.

AP 7.1 Beschreibung der Steuerungscharakteristik und Erarbeitung eines Steuerungskonzepts

Abbildung 18 zeigt schematisch den Aufbau der Regelung, die zum Betrieb des Hochleistungstreibsystems 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 geregelt und die Seilvorspannkraft über den Antrieb der Seiltrommel. 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 Regler gegenseitig beeinflussen. So führt eine Erhöhung oder Verringerung der Drehzahl des Treibscheibenantriebs beispielsweise je nach Drehrichtung zu einer Spannung oder Entspannung des Drahtseils.

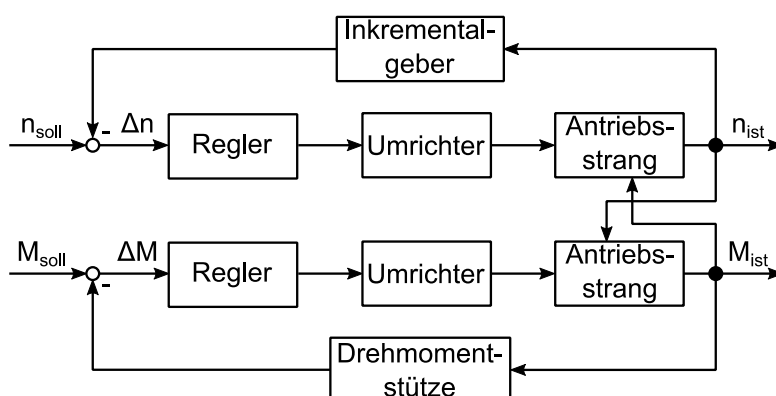


Abbildung 18: Blockdiagramm der Drehmoment-Drehzahl-Regelung des Hochleistungstreibsystems

Für den Versuchsbetrieb in AP 4 wurde zusätzlich zur eben beschriebenen Steuerung noch eine Drehmomentsteuerung an der Lasttrommel angebracht. Diese dient dazu, im Versuchsbetrieb eine schwankende Last zu erzeugen, wie es der Versuchsplan erforderte.

AP 8 Aufbereitung der Forschungsergebnisse

Letztes Arbeitspaket des Forschungsvorhabens ist die Aufbereitung der Forschungsergebnisse in Form eines Abschlussberichts.

AP 8.1 Abschlussbericht

Die Berichterstattung in Form eines Abschlussberichts ist mit dem vorliegenden Dokument erfolgt.

2 Verwendung der Zuwendung

Der Aufwand für wissenschaftlich-technisches Personal (Einzelansatz A.1 des Finanzierungsplans) ist in Tabelle 15 in Personenmonaten, aufgeschlüsselt nach Arbeitspaketen, dargestellt.

Tabelle 15: Aufwand für wissenschaftliches Personal

AP	Titel	Verwendung der Zuwendung
AP 1	Eingrenzung der Arbeitsparameter	
AP 1.1	Analyse der Technik, Vorschriften und Sicherheitsanforderungen	0,91 PM
AP 1.2	Ermittlung der Arbeitsparameter	0,91 PM
AP 1.3	Wahl eines Referenzsystems	0,91 PM
AP 2	Tribologie – Auswahl Beschichtungsverfahren und Seilkonstruktionen	
AP 2.1	Aufstellung der Anforderungen an die Beschichtung	0,91 PM
AP 2.2	Vorauswahl der Beschichtungsverfahren anhand der Anforderungsliste	0,91 PM
AP 2.3	Analyse anwendungstypischer und alternativer Seilkonstruktionen	0,91 PM
AP 3	Reibwertversuche – Vorbereitung und Ausführung	
AP 3.1	Versuchsvorbereitungen	1 PM
AP 3.2	Versuchsdurchführung und Auswertung	2 PM
AP 4	Performancetest des Hochleistungstreibsystems im Labor	
AP 4.1	Anpassung des Windenprüfstands	4 PM
AP 4.2	Abbildung anwendungsrelevanter Szenarien am Windenprüfstand	4 PM
AP 5	Bewertung der Seilschädigung	
AP 5.1	Analyse des Seils auf Verschleißerscheinungen, Drahtbruchzählung	3 PM
AP 6	Aufbereitung von Berechnungsgrundlagen zur Auslegung	
AP 6.1	Theoretische Betrachtung zur Lastverteilung im Seiltrieb	0,91 PM
AP 6.2	Berechnungsgrundlagen für Gestaltung, Dimensionierung und Betrieb	0,91 PM
AP 7	Erarbeitung eines Steuerungskonzepts	
AP 7.1	Beschreibung der Steuerungscharakteristik und Erarbeitung eines Steuerungskonzepts	0,91 PM
AP 8	Aufbereitung der Forschungsergebnisse	
AP 8.1	Abschlussbericht	1 PM
Summe		23,19 PM

Aufwendungen für Geräte entfallen (Einzelansatz B des Finanzierungsplans).

Aufwendungen für Leistungen Dritter entfallen (Einzelansatz C des Finanzierungsplans).

3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Die durchgeführten Forschungsarbeiten waren notwendig und angemessen, da sie den Punkten im Arbeitsplan des Projektantrags entsprachen. Dadurch wurden alle im Arbeitsplan formulierten Arbeiten bearbeitet und die Forschungsziele erreicht.

4 Ergebnistransfer in die Wirtschaft

Nachfolgend ist dargestellt, mit welchen spezifischen Maßnahmen der Ergebnistransfer in die Wirtschaft erfolgt und künftig angedacht ist.

4.1 Spezifische Transfermaßnahmen während der Projektlaufzeit

Maßnahme	Ziel	Ort / Rahmen	Datum / Zeitraum
Information der Unternehmen des Projektbegleitenden Ausschusses (PA)	Abstimmung über Arbeitsstand und Vorgehensweise regelmäßiger, ausführlicher Ergebnistransfer	Sitzungen des PA	Geplant: unmittelbar zu Beginn der Arbeiten im 3., 5. und 8. Quartal des Bewilligungszeitraums Durchgeführt: - Kickoff-Meeting am 02.08.2018 - Status-Meeting am 07.10.2019 - Status-Meeting am 14.07.2020 - Erste Abschlussbesprechung am 08.12.2020 - Zweite Abschlussbesprechung am 09.12.2020
Gezielte Ansprache potentiell interessierter Unternehmen außerhalb des PA	weitere Verbreitung der Technologie in der Wirtschaft, besonders der Intralogistik Einbindung interessierter Unternehmen, Forschungsvereinigungen (FV) und Verbände (VDI, Drahtseil-Vereinigung e. V. (DSV)) direkter Transfer in die Industrie	Präsentation der Ergebnisse auf öffentlichen Tagungen: Internationale Kranfachtagung, Fachtagungen des VDI individuelle Ansprache	Geplant: Haupt- und Schlussphase nach Bedarf im gesamten Zeitraum Durchgeführt: - Nach Ansprache Beitritt der Unternehmen Elaskon Sachsen GmbH & Co. KG für Spezienschmierstoffe, LIFTKET Hoffmann GmbH und Planeta Hebetchnik GmbH

Maßnahme	Ziel	Ort / Rahmen	Datum / Zeitraum
			zum PA
wissenschaftliche Publikationen in Fachzeitschriften, Dissertationen, Studienarbeiten	<p>Verbreitung der Ergebnisse an interessierte Fachleute bzw. Unternehmen</p> <p>Vermitteln von Kenntnissen und Heranführen an eigenständiges wissenschaftliches Arbeiten</p>	<p>Veröffentlichungen in Fachzeitschriften</p> <p>Studien-, Diplomarbeiten und ggf. eine Dissertation</p>	<p>Geplant: in der Schlussphase mit Beginn des Vorhabens</p> <p>Durchgeführt: - Studienarbeit zur Versuchsvorbereitung/-durchführung der Reibwertversuche, Fertigstellung 06/2019</p>
Vorstellung der Ergebnisse / Vorträge und Präsentationen	<p>nationaler und internationaler Ergebnistransfer</p> <p>Information der Mitglieder der FV sowie interessierter Fachleute</p>	<p>Vorträge im Rahmen der Fachkolloquiums der Wissenschaftlichen Gemeinschaft für Technische Logistik (WGTL) inklusive eines Artikels im Tagungsband</p> <p>der Internationalen Kranfachtagung inklusive eines Artikels im Tagungsband</p> <p>Tagungen / Versammlungen der FV und Forschungsstelle</p>	<p>Geplant: im 1. Jahr nach Abschluss</p> <p>Durchgeführt: - Vortrag und Artikel im Tagungsband der Kranfachtagung 2020 in Magdeburg - Bewerbung eingereicht für einen Artikel und Vortrag zur OIPEEC Conference / zu den 7. International Ropedays 2021; verschoben auf 2022 wegen Covid-19</p>
Vorstellung in anderen Fach und Branchenverbänden	(inter-)nationaler Ergebnistransfer	<p>Fachausschüsse des VDI im Fachbereich Produktion und Logistik</p> <p>Branchenverbände EWRIS, OIPEEC DSV</p>	Geplant: eine Veranstaltung im 1. Halbjahr nach Abschluss
Einbeziehung von Multiplikatoren	Zusammenarbeit in der Forschungslandschaft, Knowhow-Transfer, Stärkung des Forschungsstandortes Deutschland, speziell Sachsen	<p>Forschungsprogramme „Zentrales Innovationsprogramm Mittelstand“ des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie (BMWi)</p> <p>Verbundprojektförderung auf dem Gebiet der</p>	Geplant: fortlaufend

Maßnahme	Ziel	Ort / Rahmen	Datum / Zeitraum
		Zukunftstechnologien im Freistaat Sachsen	

4.2 Spezifische Transfermaßnahmen nach Abschluss des Vorhabens

Maßnahme	Ziel	Ort / Rahmen	Datum / Zeitraum
gezielte Ansprache potentiell interessierter Unternehmen außerhalb des PA	weitere Verbreitung der Technologie in der Wirtschaft, besonders der Intralogistik Einbindung interessierter Unternehmen, Forschungsvereinigungen (FV) und Verbände (VDI, Drahtseil-Vereinigung e. V. (DSV)) direkter Transfer in die Industrie	Präsentation der Ergebnisse auf öffentlichen Tagungen: Internationale Kranfachtagung, Fachtagungen des VDI individuelle Ansprache	Geplant: Haupt- und Schlussphase nach Bedarf im gesamten Zeitraum Durchgeführt: - Ansprache des Unternehmens DIEPA Drahtseilwerk Dietz GmbH & Co. KG bezüglich des Beitritts zum PA für das geplante Folgevorhaben
wissenschaftliche Publikationen in Fachzeitschriften, Dissertationen, Studienarbeiten	Verbreitung der Ergebnisse an interessierte Fachleute bzw. Unternehmen Vermitteln von Kenntnissen und Heranführen an eigenständiges wissenschaftliches Arbeiten	Veröffentlichungen in Fachzeitschriften Studien-, Diplomarbeiten und ggf. eine Dissertation	Geplant: mindestens eine Publikation in einer Fachzeitschrift (z. B. Hebezeuge Fördermittel)
Vorstellung der Ergebnisse / Vorträge und Präsentationen	nationaler und internationaler Ergebnistransfer Information der Mitglieder der FV sowie interessierter Fachleute	Vorträge im Rahmen der Fachkolloquiums der Wissenschaftlichen Gemeinschaft für Technische Logistik (WGTL) inklusive eines Artikels im Tagungsband der Internationalen Kranfachtagung inklusive eines Artikels im Tagungsband Tagungen /	Geplant: im 1. Jahr nach Abschluss Durchgeführt: Bewerbung für OIPEEC 2021 durch Verschiebung gültig für OIPEEC Conference / zu den Ropedays

Maßnahme	Ziel	Ort / Rahmen	Datum / Zeitraum
		Versammlungen der FV und Forschungsstelle	
Vorstellung in anderen Fach und Branchenverbänden	(inter-)nationaler Ergebnistransfer	Fachausschüsse des VDI im Fachbereich Produktion und Logistik Branchenverbände EWRIS, OIPEEC DSV	Geplant: eine Veranstaltung im 1. Halbjahr nach Abschluss
Einbeziehung von Multiplikatoren	Zusammenarbeit in der Forschungslandschaft, Knowhow-Transfer, Stärkung des Forschungsstandortes Deutschland, speziell Sachsen	Forschungsprogramme „Zentrales Innovationsprogramm Mittelstand“ des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie (BMWi) Verbundprojektförderung auf dem Gebiet der Zukunftstechnologien im Freistaat Sachsen	Geplant: fortlaufend

5 Literaturverzeichnis

- [1] Weiskopf, U.: Untersuchung zur Lebensdauer von Kranhubseilen in der Mehrlagenwicklung, Stuttgart, Dissertation, 2008
- [2] DGUV V 54:1980-04, Unfallverhütungsvorschrift Winden, Hub und Zuggeräte
- [3] DGUV V 52:1974-12, Unfallverhütungsvorschrift Krane
- [4] DIN EN 14439:2010-03, Krane – Sicherheit – Turmdrehkrane
- [5] ISO 16625:2013-07, Cranes and hoists — Selection of wire ropes, drums and sheaves
- [6] DIN EN 14492-2:2010-05, Krane – Kraftgetriebene Winden und Hubwerke – Teil 2: Kraftgetriebene Hubwerke
- [7] Det Norske Veritas AS (Hrsg.): DNV Standard for Certification 2.22 Lifting Appliances, Høvik, NO, 06.2018 (2018-00-12)
- [8] Liebherr-Werk Ehingen GmbH (Hrsg.): Mobilkran LTM 1030-2.1, Ehingen, DE, URL: <https://www.liebherr.com/de/deu/produkte/mobil-und-raupenkrane/mobilkrane/ltm-mobilkrane/details/ltm103021.html> (2018-00-02)
- [9] Liebherr-Werk Ehingen GmbH (Hrsg.): Mobilkran LTM 1030-2.1 - Technische Daten, Ehingen, DE (2018-00-29)
- [10] Liebherr-Werk Ehingen GmbH (Hrsg.): Mobilkran LTM 11200-9.1, Ehingen, DE, URL: <https://www.liebherr.com/de/deu/produkte/mobil-und-raupenkrane/mobilkrane/ltm-mobilkrane/details/ltm1120091.html> (2018-00-02)
- [11] Liebherr-Werk Ehingen GmbH (Hrsg.): Teleskop-Raupenkran LTR 1060, Ehingen, DE, URL: <https://www.liebherr.com/de/deu/produkte/mobil-und-raupenkrane/raupenkrane/ltr-teleskop-raupenkrane/details/ltr1060.html> (2018-00-02)
- [12] Liebherr-Werk Ehingen GmbH (Hrsg.): Raupenkran LR 13000 - Technische Daten, Ehingen, DE, URL: <https://www.liebherr.com/de/deu/produkte/mobil-und-raupenkrane/raupenkrane/lr-raupenkrane/details/lr13000.html> (2018-00-02)
- [13] Liebherr-Werk Ehingen GmbH (Hrsg.): Raupenkran LR 13000, Ehingen, DE, URL: <https://www.liebherr.com/de/deu/produkte/mobil-und-raupenkrane/raupenkrane/lr-raupenkrane/details/lr13000.html> (2018-00-05)
- [14] Liebherr-Werk Ehingen GmbH (Hrsg.): Raupenkran LR 13000, Ehingen, DE, URL: <https://www.liebherr.com/de/deu/produkte/mobil-und-raupenkrane/raupenkrane/lr-raupenkrane/details/lr13000.html> (2018-00-02)
- [15] Liebherr-Werk Biberach GmbH (Hrsg.): Turmdrehkran 13 HM.1, Biberach an der Riss, DE, URL: <https://www.liebherr.com/de/deu/produkte/baumaschinen/turmdrehkrane/schnelleinsatzkrane/hm-krane/details/71637.html> (2018-00-22)

- [16] Liebherr-Werk Biberach GmbH (Hrsg.): Turmdrehkran zur Montage von Windenergieanlagen - 1000 EC-B 125, Biberach an der Riss, DE, URL: <https://www.liebherr.com/de/deu/produkte/baumaschinen/turmdrehkrane/obendreherkrane/flat-top-ec-b/details/72343.html> (2018-00-22)
- [17] DIN 21258:2007-10, Schmier- und Tränkungsstoffe für Treibscheiben-Förderseile im Bergbau – Sicherheitstechnische Anforderungen und Prüfung
- [18] Casar Drahtseilwerk Saar GmbH (Hrsg.): Casar - Your rope is our passion, URL: <https://www.casar.de/de> (2020-00-23)
- [19] Casar Drahtseilwerk Saar GmbH (Hrsg.): Casar Starlift, Kirkel, DE, 03.2019, URL: <https://www.casar.de/Portals/0/Documents/Product-Specs/Starlift.pdf#>
- [20] Casar Drahtseilwerk Saar GmbH (Hrsg.): Casar Turboplast, Kirkel, DE, 03.2019, URL: <https://www.casar.de/Portals/0/Documents/Product-Specs/Turboplast.pdf#>
- [21] Seidenather, C.: Keeping it smooth, in: International Cranes And Specialized Transport, 2007, (10), S. 51–53, URL: <http://www.lebus-germany.com/Downloads/dl-international-cranes-0710.pdf> (2019-00-22)
- [22] DIN ISO 4309:2013-06, Krane - Drahtseile - Wartung und Instandhaltung, Inspektion und Ablage
- [23] Gräbner, P.: Die Magnettreibscheibe als Basis leichter Konstruktion, in: Hebezeuge Fördermittel, 2008, **48**(5), S. 356–359
- [24] Herhold, R. und Leonhardt, T.: Einsatz von Magnettreibscheiben zur Erhöhung der Treibfähigkeit, in: Krause, F. und Horn, P. (Hrsg.): Von innovativer Krantechnik bis Virtual Reality. 16. Internationale Kranfachtagung 2008 ; Begleitband zur Kranfachtagung am 18. April 2008 in Magdeburg. Als Ms. gedr. Magdeburg: LOGiSCH, 2008. ISBN 978-3-930385-67-6
- [25] Balke, H.: Einführung in die Technische Mechanik - Statik, 3. Auflage, Berlin: Springer, 2010, ISBN 978-3-642-10397-1