

Betriebsdauer von Drahtseilen beim Lauf über Kunststoff-Seilrollen

PROF. DR.-ING.HABIL. HANS-GEORG MARQUARDT

DIPL.-ING. THOMAS BARTHEL

INSTITUT FÜR FÖRDERTECHNIK, BAUMASCHINEN UND LOGISTIK, TECHNISCHE UNIVERSITÄT DRESDEN

Zusammenfassung

Kunststoff-Seilrollen sind leichter als Stahl-Seilrollen, woraus für die Konstruktion, besonders von Auslegerkränen, Vorteile erwachsen. Kunststoff-Seilrollen bringen aber auch Vorteile für das Seil selbst, weil sich dessen Lebensdauer vergrößert. Dieser Lebensdauererwerb wurde durch umfassende experimentelle und theoretische Untersuchungen zum Einfluss von Kunststoff-Seilrollen auf die Drahtseillebensdauer quantifiziert und begründet. Zur sicherheitstechnischen Beherrschung von Seiltrieben mit Kunststoff-Seilrollen wird eine Online-Schadensakkumulation vorgeschlagen.

Abstract

Plastic pulleys are lighter than steel pulleys. So they bring benefits for the construction, especially of boom cranes. Furthermore plastic pulleys bring benefits for the rope itself by increasing thus service life. This service life benefit was quantified and explained by comprehensive experimental and theoretical examinations about the influence of plastic pulleys to the wire rope service life. To guarantee technical safety an online damage addition is recommended.

1. Einleitung

Für Seiltriebe mit Stahl-/Grauguss-Seilrollen bestehen detaillierte Berechnungsverfahren zur betriebsfestigkeitsgerechten Auslegung. Obwohl vermehrt Kunststoff-Seilrollen verwendet werden, existiert für die Berechnung solcher Seiltriebe lediglich ein pauschaler, auf punktuellen Untersuchungen basierender Korrekturfaktor [Feyrer00]. Kunststoff-Seilrollen sind leichter als Stahl-Seilrollen, woraus für die Konstruktion, besonders von Auslegerkränen, Vorteile erwachsen. Kunststoff-Seilrollen bringen aber auch Vorteile für das Seil selbst, weil sich dessen Lebensdauer vergrößert. Obwohl das schon seit Jahrzehnten bekannt ist, konnte davon wegen des Fehlens systematischer Untersuchungen und demzufolge eines entsprechenden, abgesicherten Berechnungsverfahrens aus sicherheitstechnischen Aspekten noch kein Gebrauch gemacht werden. Ziel eines DFG-Forschungsprojekts war deshalb die grundlegende Untersuchung des Einflusses von Kunststoff-Seilrollen auf die Lebensdauer und, darauf unter Berücksichtigung von sicherheitstechnischen Aspekten aufbauend, die Ableitung eines Dimensionierungsverfahrens für Seiltriebe mit Kunststoff-Seilrollen [Barthel06]. Unabdingbarer Bestandteil der experimentell-theoretischen Untersuchungen war die Konkretisierung der Bedingungen für die regelmäßigen Betriebsprüfungen.

2. Experimentelle Untersuchungen

2.1. Prüfstandsversuche

Zur experimentellen Untersuchung des Einflusses der Kunststoff-Seilrollen auf die Drahtseil-Betriebsdauer wurden Lebensdaueruntersuchungen mit einem einfachen Rundlitzenseil 6x19S nach

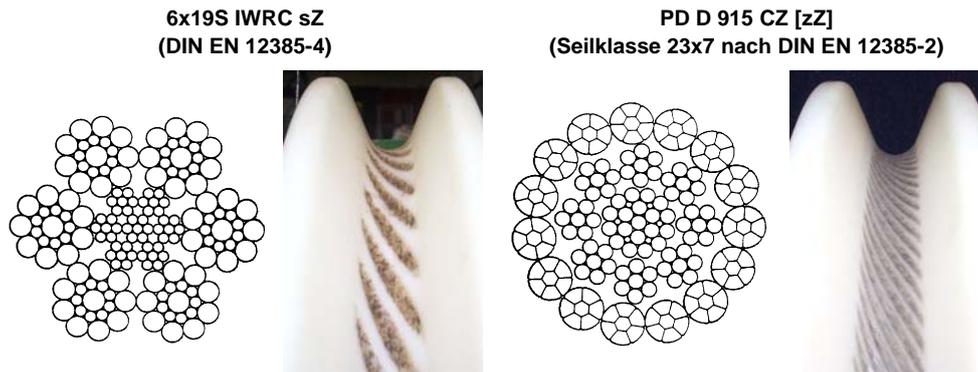


Abbildung 1: Untersuchte Seilkonstruktionen mit zugehörigen Eingrabungen in Kunststoff-Seilrollen

DIN EN 12385-4 (fortan „Litzenseil“ genannt) und einem zweilagigen drehungsarmen Kranseil 23x7 (hier vielleicht eine Einheit angeben) mit verdichteten Außenlitzen gemäß DIN EN 12385-2 (fortan „Hubseil“ genannt) durchgeführt. Neben den aus Polyamid 6G gefertigten Kunststoff-Seilrollen (fortan „Kunststoffrollen“ genannt) (Abb. 1) kamen bei Referenzversuchen Stahl-Seilrollen (fortan „Stahlrollen“ genannt) zum Einsatz. Das D/d -Verhältnis betrug konstant 20. Zur Gewährleistung einer konstanten Vergleichsbasis wurden Stahlrollen mit induktiv gehärteten Seilrillen eingesetzt und bei den Kunststoffrollen die Seilführungseinheiten (Kränze) nach jedem Seilwechsel erneuert. Die Untersuchungen erfolgten auf einem Seilprüfstand mit drei Biegezone (Abb. 2) mit Biegelängen von 2030 mm. Die drei Biegezone liefern i. Allg. drei Betriebsdauerwerte je Versuch, es sei denn, das Seil reißt (in der am meisten geschädigten Biegezone), bevor es in der am wenigsten geschädigten Biegezone die Ablegereife erreicht hat. Die Versuchsdurchführung erfolgte unter Beachtung der OIPEEC-Recommendations Nr. 1 bis 6 [OIPEEC]. Mit den Lasthorizonten 15, 25, 50 und 75 kN wurden der für den verwendeten Seildurchmesser (16mm) zulässige Seilkraftbereich abgedeckt und auch dessen 25%-ige Überschreitung untersucht. Als Kriterium für das Erreichen der Ablegereife diente die Drahtbruchzahl B_{30} nach DIN 15020.

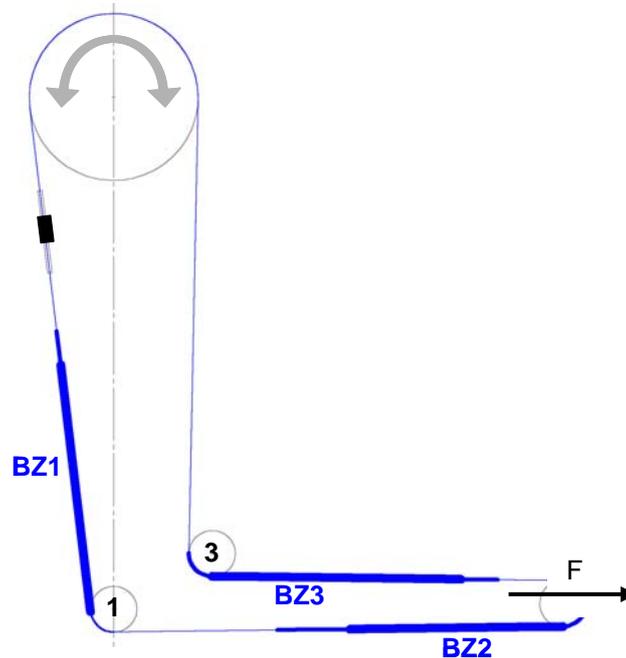


Abbildung 2: Seiltriebschema mit Seilrollen 1 bis 3 und Biegezone BZ1 bis BZ3

2.2. Magnetinduktive Drahtseilprüfung

Wie erwartet, traten nur bei der Kombination Litzenseil – Stahlrolle äußerlich gut sichtbare Drahtbrüche auf. Bei den drei anderen Kombinationen entstanden die Drahtbrüche überwiegend im Drahtseilinneren, so dass mit einem magnetinduktiven Seilprüfgerät gearbeitet werden musste. Nach [Feyrer00] endet das Auflösungsvermögen der magnetinduktiven Drahtseilmessung bei $B_{30} > 15$, so dass bei den hier abzurufenden Ablegedrahtbruchzahlen von $B_{30,a} = 10$ für das Hubseil und $B_{30,a} = 12$ für das Litzenseil keine Probleme zu erwarten waren. Dennoch war die Auswertung der Signalverläufe aufwändig. Nur durch das Öffnen einer Vielzahl abgelegter Seilabschnitte und durch zusätzliche, bereits vor dem Erreichen der Ablegereife abgebrochene Versuche, konnten eine geeignete Messtechnologie entwickelt und der erarbeitete Auswertalgorithmus kalibriert werden. Zur maximalen Informationsextraktion und zur Gewährleistung der Reproduzierbarkeit wurden die Messsignale rechnergestützt ausgewertet. Dazu wurde der Signalverlauf wie durch [Both01] als eine Folge von Signalmustern interpretiert und dann mit Hilfe eines statistischen Tests für jedes Signalmuster festgestellt, ob es einen Drahtbruch repräsentiert. Bei dieser Vorgehensweise mussten Fehler 1. Art (es wird ein Drahtbruch angezeigt, obwohl keiner vorhanden ist) zugelassen, und Fehler 2. Art (der Drahtbruch wird übersehen) akzeptiert, beziehungsweise pauschal korrigiert werden.

2.3. Ergebnis der experimentellen Untersuchungen

Die Visualisierung der Versuchsergebnisse im Wahrscheinlichkeitsnetz (Abb. 3 u. 4) zeigt, dass die Ergebnisse des Versuchs 15KH (15kN, Kunststoffrolle, Hubseil) nicht der bei der statistischen Auswertung von Lebensdaueruntersuchungen vorausgesetzten Lognormalverteilung entsprechen.

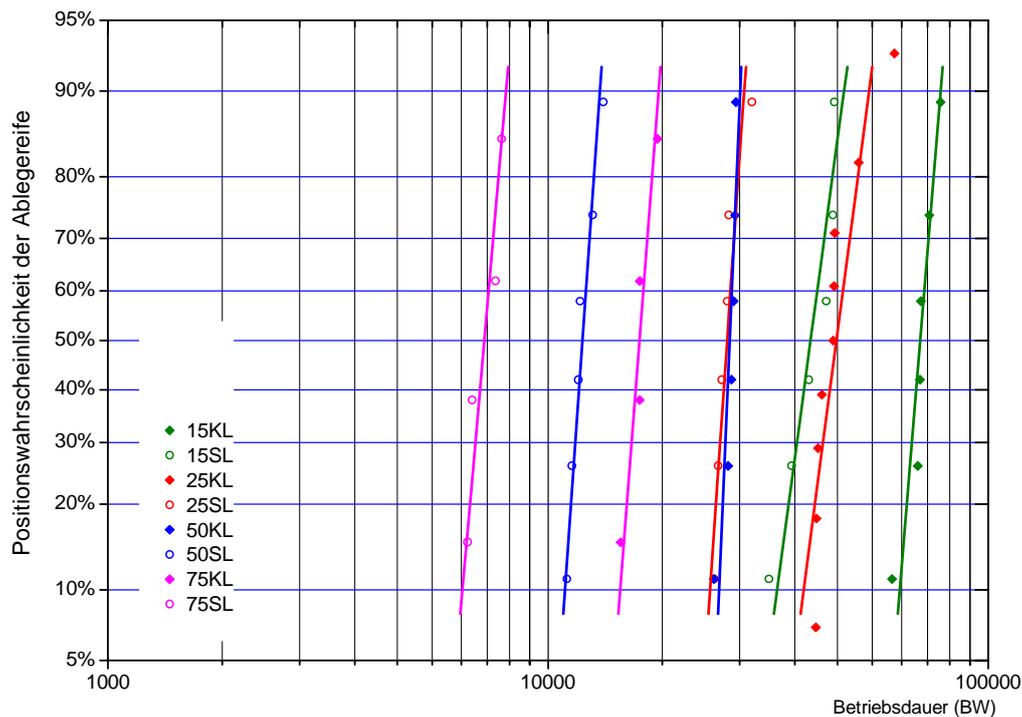


Abbildung 3: Darstellung der experimentell ermittelten Ablebiegewechselzahlen des Litzenseils im Wahrscheinlichkeitsnetz

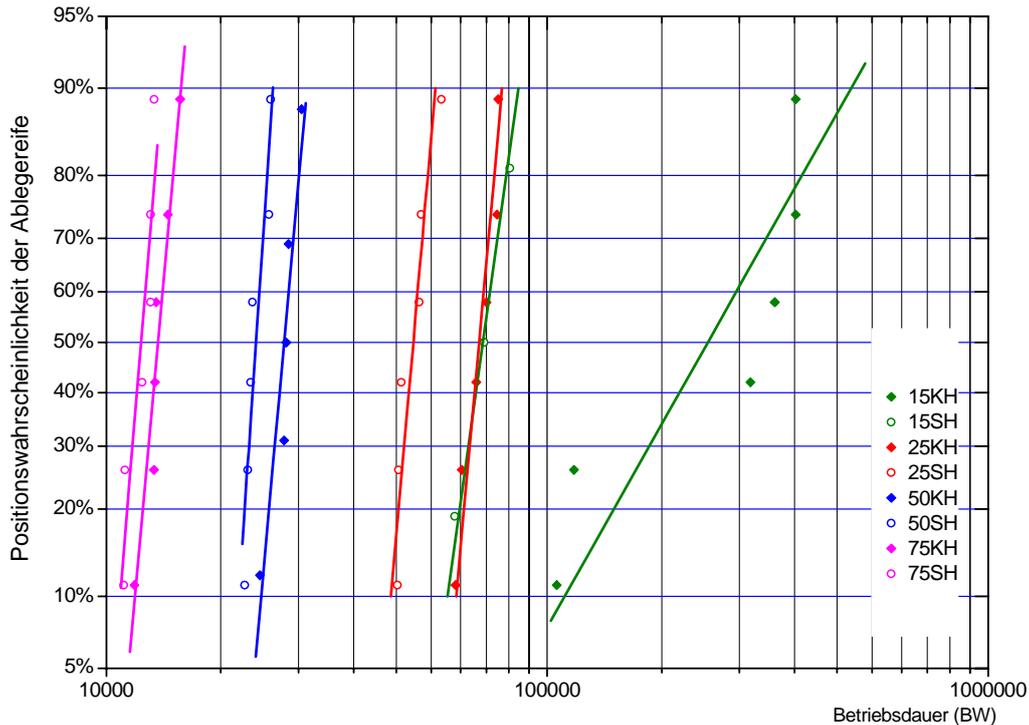


Abbildung 4: Darstellung der experimentell ermittelten Ablebiegewechselzahlen des Hubseils im Wahrscheinlichkeitsnetz

Nach [Haibach89] deutet das Abweichen von der Lognormalverteilung auf Prüfhorizonte am Übergang zur Dauerfestigkeit hin. Da bewegte Drahtseile einem inneren Verschleiß unterliegen, und demzufolge auch bei kleinen Seilkräften nicht dauerfest sind, wird für diesen Versuch ein Abknicken der Zeitfestigkeitsgeraden in einen dauerfestigkeits-ähnlichen Bereich unterstellt. Demzufolge konnten die Versuchsergebnisse 15KH für die Regression der ausschließlich zur Beschreibung des Zeitfestigkeitsbereiches geeigneten Betriebsdauerlinien nicht verwendet werden. Aus Symmetriegründen wurden auch die Versuchsergebnisse 15SH von der Regression ausgeschlossen. Die aus den Versuchsergebnissen abgeleiteten Betriebsdauerlinien (Abb. 5) zeigen für die untersuchten Prüfseile unterschiedliche Tendenzen, die eine gegenläufige Seilkraftabhängigkeit der Betriebsdauerfaktoren (Abb. 6) begründen.

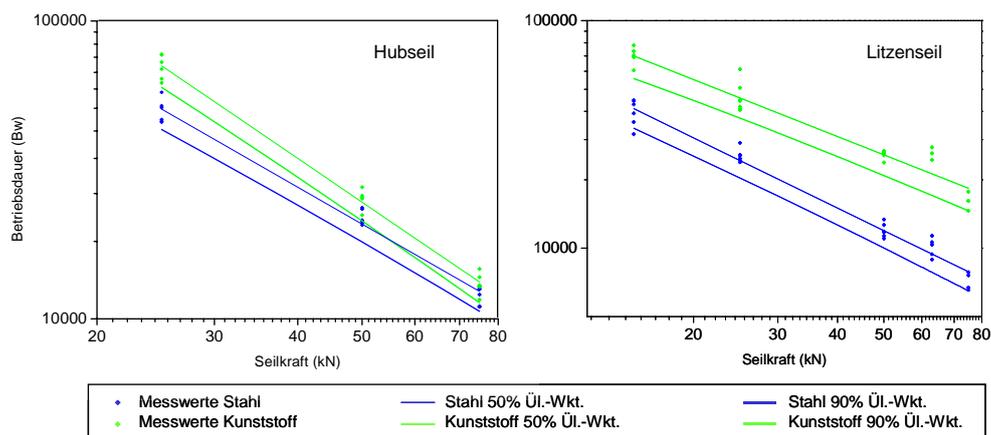


Abbildung 5: Ablebiegewechselzahlen und daraus abgeleitete Betriebsdauerlinien für 50% und 90% Überlebenswahrscheinlichkeit bei 5% Irrtumswahrscheinlichkeit

Dabei stimmt der Betriebsdauerfaktor des Litzenseiles in Größenordnung und Seilkraftabhängigkeit gut mit dem aus der Literatur [Feyrer00] bekannten Faktor für die Lebensdauerwerte überein, wogegen der für das Hubseil ermittelte mit der Seilkraft abnimmt. Dieser bisher unbekannt Sachverhalt wird auf das Tragverhalten drehungsarmer Seile zurückgeführt: Das in [Feyrer97] beschriebene, und bei den eigenen Untersuchungen ebenfalls beobachtete Drehverhalten drehungsarmer Seile, gekennzeichnet durch Zudrehen bei kleinen und leichtes Aufdrehen bei größeren Seilkräften, geht zwangsläufig mit einer relativen Entlastung der Außenlitzen

bei größeren Seilkräften einher. Für die so entlasteten Außenlitzen ist die nachgiebige Bettung in der Kunststofffrille offenbar nicht relevant, vielmehr stellen sie selbst eine harte Bettung für die zwangsläufig leicht zgedrehten, also verkürzten und demzufolge unverhältnismäßig hoch belasteten Innenlitzen dar. Diese These wird durch die bei den Drahtseildemontagen angetroffenen Verteilungen der Drahtbrüche über den Seilquerschnitt gestützt.

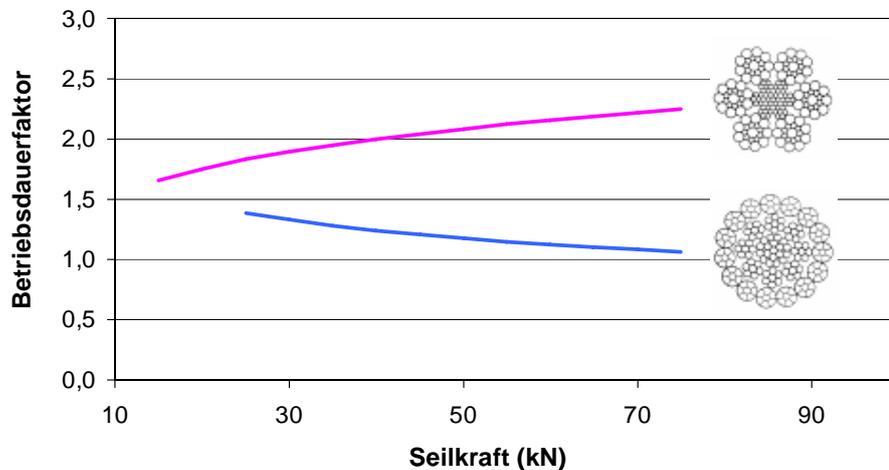


Abbildung 6: Experimentell ermittelte Betriebsdauerfaktoren für das Litzenseil (oben) und das Hubseil

3. Theoretische Untersuchungen

Zur theoretischen Untersuchung des zwischen Stahl- und Kunststoff-Seilrollen existierenden Unterschiedes im Seil-Beanspruchungsmechanismus wurde ein Berechnungsmodell zur Erfassung des Beanspruchungsverlaufs zwischen Seil und Seilrolle entwickelt, das auch den Einfluss des Rollenwerkstoffes quantitativ erfasst. Das Berechnungsmodell geht von einem ursprünglich als unbelastet gedachten und demnach geraden, horizontal liegenden Seil aus, das durch die richtungstreue Seilkraft F um den Winkel α an der Seilrolle umgelenkt wird (Abb. 7). Wegen der Annahme des vor der Belastung geraden Seils liefert das Verfahren für $\alpha < 15^\circ$ brauchbare Vergleichswerte. Das Seil zerfällt für die Berechnung in zwei qualitativ unterschiedliche Bereiche:

- Bereich 1 („Ber. 1“ in Abb. 7) ist durch nachgiebige Bettung des Seils auf der Seilrolle gekennzeichnet. Die später benötigte Bettungszahl k folgt aus der Hintereinanderschaltung der Federeigenschaften von Seil und Rolle.
- Im „Ber. 2“ ist das Seil frei und nähert sich asymptotisch für $z_2 \rightarrow \infty$ der z_2 -Achse.

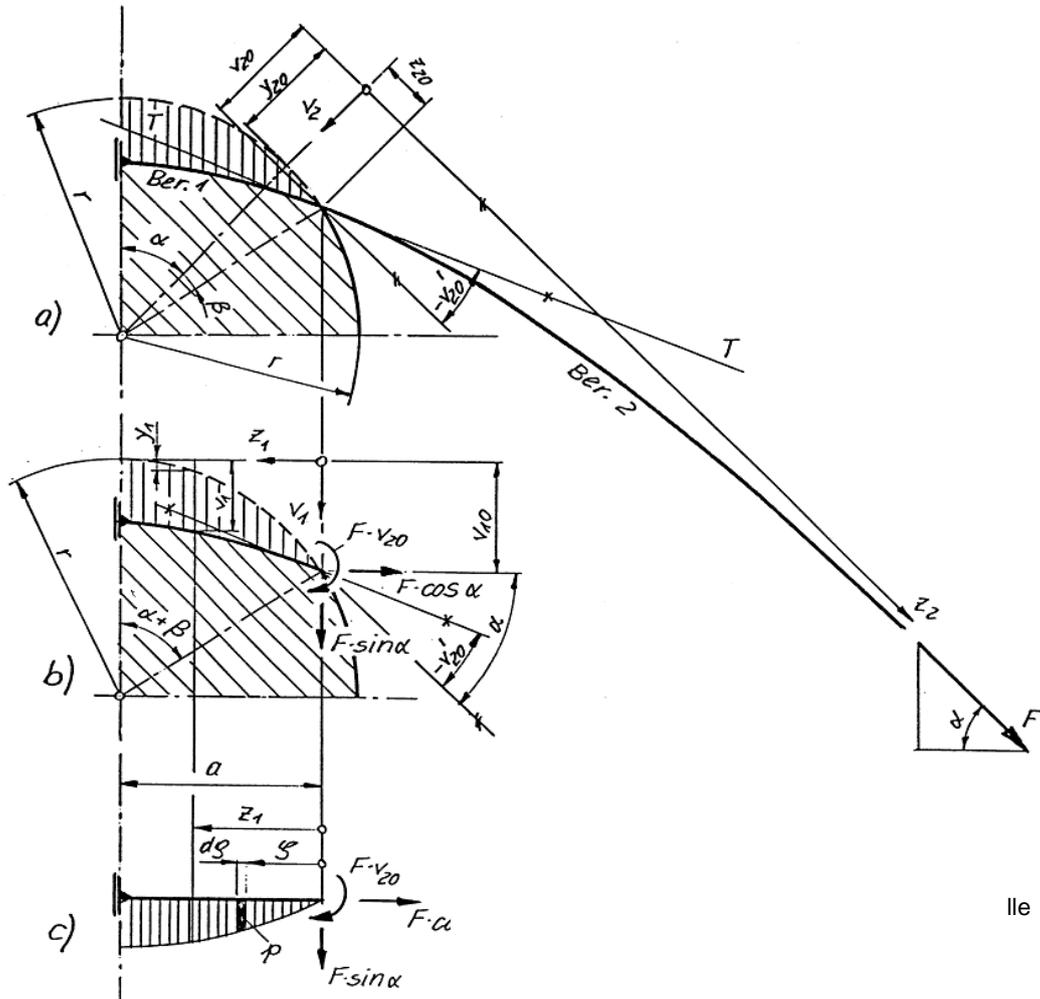


Abbildung 7: Berechnungsmodell Seil – Seilrolle
 a) gesamtes Tragwerk b) Bereich 1 verformt c) Bereich 1 unverformt

Das Berechnungsmodell berücksichtigt neben den Federeigenschaften von Seilquerschnitt und Seilrolle auch die Biegesteifigkeit des Seiles. Daher werden für unterschiedliche Seilkonstruktionen auch bei gleicher Rolle unterschiedliche Beanspruchungsverläufe berechnet. Das für Stahlrollen typische lokale Maximum der Linienkraft q in der Nähe des Auflaufpunktes des Seiles auf die Rolle (vgl. [Häberle95]) tritt bei Kunststoffrollen nicht auf (Abb. 8). Der Schluss auf die in-teressierende maximale Pressung p im Rillengrund erfolgt mit Hilfe eines Berechnungsmodells für

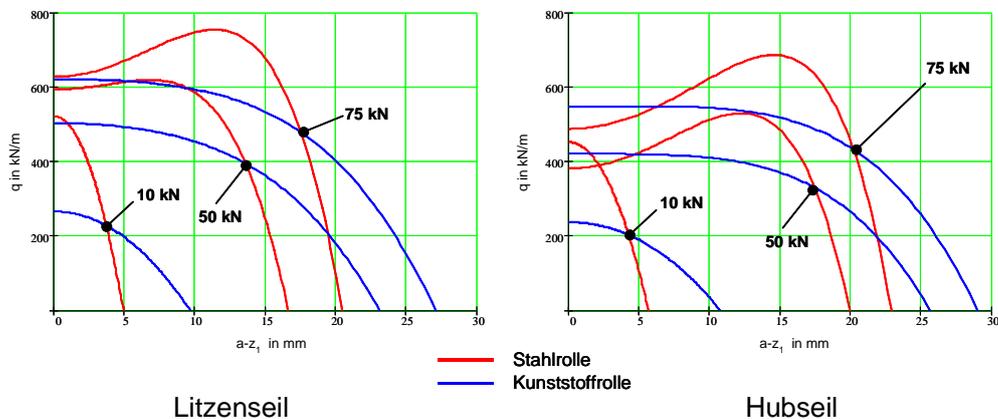


Abbildung 8: Berechneter Verlauf der Linienkraft q für drei unterschiedliche Seilkräfte entlang der halben Sehne zwischen Scheitel- und Ablaufpunkt des Seils auf der Rolle

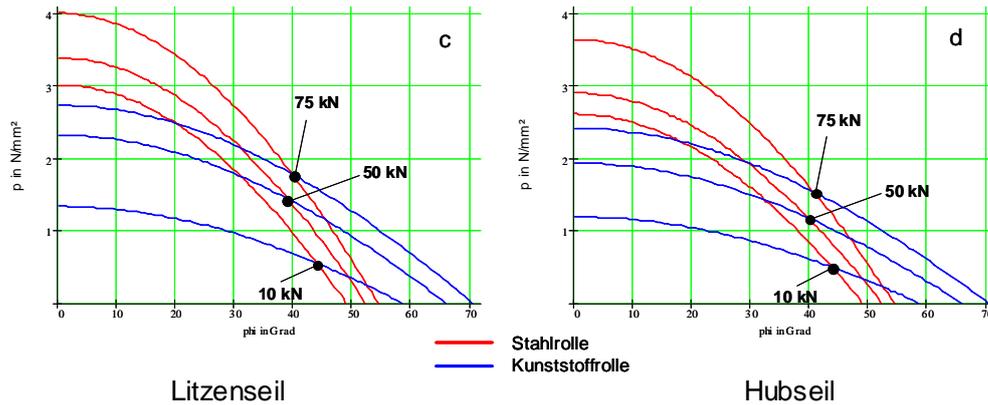


Abbildung 9: Berechneter Verlauf der Flächenkraft p für drei unterschiedliche Seilkräfte quer zur Rille, beginnend im Rillengrund

Bolzenselenke unter Zuhilfenahme der experimentell in Abhängigkeit von der Seilkraft bestimmten Kontaktwinkel zwischen Seil und Seilrille sowie der Bettungszahl k . Die erhaltenen Ergebnisse (Abb. 9) eignen sich gut für Vergleichsrechnungen zwischen Stahl- und Kunststoffrollen. Angewandt auf die experimentell untersuchten Drahtseilkonstruktionen, reduzieren sich die maximalen Pressungen infolge des Einsatzes von Kunststoffrollen beim Litzenseil um 31% und beim Hubseil um 32%. Mit Hilfe der berechneten Pressungsminderung kann das Drahtseil-Berechnungsverfahren TGL 34022 [Steinbach04] erweitert werden, indem die dort ermittelte Druckspannung mit dem hier berechneten Minderungsquotienten korrigiert wird. Für das Litzenseil ist der mit dieser Erweiterung berechnete Betriebsdauerfaktor (Abb. 10) prinzipiell kleiner als der experimentell ermittelte und damit sicher anwendbar. Beim Hubseil ist der berechnete Betriebsdauerfaktor dagegen prinzipiell größer als der experimentell ermittelte. Damit kann das erweiterte Berechnungsverfahren TGL 34022 zunächst nicht auf mehrlagige drehungsarme Seile angewendet werden. Leider konnten gerade die Versuchsdaten, die einen großen Effekt der Kunststoffrolle belegen, nicht mit in die statische Auswertung einbezogen werden. Daher sollte mit Hilfe weiterer Untersuchungen geklärt werden, ob sich bei Seiltrieben mit Kunststoffrollen der Anstieg der Zeitfestigkeitsgeraden bei kleinen Seilkräften tatsächlich ändert und welche Konsequenzen sich daraus ergeben. Die Tatsache, dass der experimentell ermittelte Betriebsdauerfaktor beim Hubseil prinzipiell kleiner ist als der berechnete, wird damit begründet, dass das oben erörterte Tragverhalten drehungsarmer Seile und dessen besondere Relevanz beim Lauf über Kunststoffrollen auch beim neuen Berechnungsmodell unberücksichtigt bleibt.

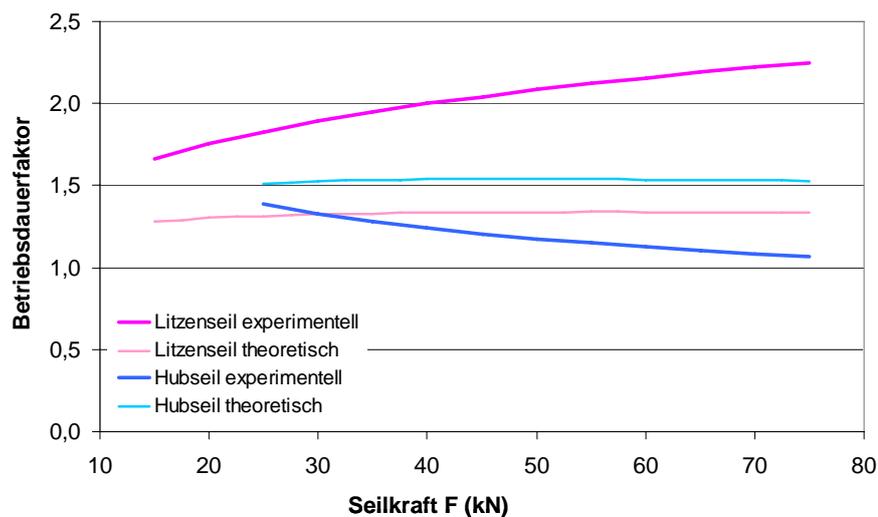


Abbildung 10: Vergleich der berechneten und der experimentell ermittelten Betriebsdauerfaktoren

4. Überwachung von Seiltrieben mit Kunststoff-Seilrollen

Dem Vorteil der vergrößerten Drahtseil-Betriebsdauer infolge des Laufes über Kunststoffrollen steht der Nachteil des Versagens des Ablegekriteriums „äußerlich sichtbare Drahtbruchzahl“ gegenüber. Der resultierende Sicherheitsverlust ist jedoch zu relativieren: Beim drehungsarmen Hubseil traten auch beim Lauf über Stahlrollen überwiegend innere, von außen nicht sichtbare, Drahtbrüche auf. Gelöst wird das Problem der Ablegereifeerkennung, sobald das Seil auf einer mehrlagig bewickelten Seiltrommel gespeichert wird. Die Mehrlagenwicklung schädigt das Seil wesentlich stärker als der Lauf über Seilrollen, sodass die Ablegereife im mehrlagig gewickelten Abschnitt des Seiles mit äußerlich sichtbaren Drahtbrüchen angezeigt wird - unabhängig vom Seilrollenwerkstoff. Damit geht jedoch der Betriebsdauervorteil infolge des Kunststoffrolleneinsatzes verloren. Es bleiben dann lediglich der Gewichtsvorteil, der leisere Lauf und je nach Anwendungsfall der Preisvorteil der Kunststoffrolle. Um sicherzustellen, dass die Ablegereife tatsächlich zuerst im mehrlagig gewickelten Abschnitt erreicht wird, sollte in jedem Falle eine Seiltriebanalyse durchgeführt werden.

Zur praktischen Nutzung des Betriebsdauervorteils ohne Sicherheitsverlust bietet sich eine Online-Schadensakkumulation an. Dazu wird das Seil gedanklich in z. B. 10 Seildurchmesser lange Abschnitte unterteilt und für jeden Abschnitt eine separate Schadensakkumulation auf der Grundlage des hier verbesserten Berechnungsverfahrens TGL 34022 durchgeführt. Für die Online- Erfassung und Zuordnung der absolvierten Biegewechsel zu den einzelnen Seilabschnitten eignet sich ein Algorithmus nach [Wünsch91], der mit einem mathematischen Ersatzmodell des Seiltriebes arbeitet und nur auf wenige Drehwinkelinformationen angewiesen ist. Das Erfassen der zuzuordnenden Seilkraft erfolgt nach dem Stand der Technik. Zum Verknüpfen der Informationen – also zur eigentlichen Schadensakkumulation – wird ein Bordcomputer benötigt, auf dem auch das Ersatzmodell des Seiltriebes läuft. Das System mahnt dann ähnlich einem PKW-Wartungsassistenten den anstehenden Seilwechsel an, sobald auf einem der gedachten Seilabschnitte die dem Grenzzustand der Ablegereife entsprechende Schädigung erreicht wird. Dieser Vorschlag wird durch die den Aufzugsbereich betreffende Sicherheitsrichtlinie Kunststoffrollen [SR_Aufzüge] legitimiert. Diese legt für über Kunststoffrollen laufende Aufzugsseile u.a. maximal zulässige Biegewechselzahlen fest.

5. Zusammenfassung

Die experimentell ermittelten Betriebsdauerwerte belegen und quantifizieren die Vergrößerung der Drahtseil-Betriebsdauer infolge des Laufes über Kunststoff-Seilrollen. Während der für das Litzenseil ermittelte Betriebsdauerfaktor qualitativ und auch quantitativ gut mit dem aus der Literatur bekannten Korrekturfaktor für die Lebensdauer übereinstimmt, nimmt der für das Hubseil ermittelte Betriebsdauerfaktor mit der Seilkraft ab. Dieser, bisher nicht dokumentierte Sachverhalt, wird auf das Tragverhalten drehungsarmer Seile zurückgeführt.

Das neue Modell zur Berechnung des Beanspruchungsverlaufs zwischen Seil und Seilrolle erfasst auch den Einfluss des Rollenwerkstoffes quantitativ. Es berücksichtigt neben den Federeigenschaften von Seilquerschnitt und Seilrolle auch die Biegesteifigkeit des Seiles. Als Maß für die Beanspruchungsminderung infolge der Kunststoff-Seilrollen dient das Verhältnis der maximalen Pressungen beim Lauf des Drahtseils über Kunststoff- und Stahl-Seilrollen. Mit Hilfe der so berechneten Beanspruchungsminderung wird ein bestehendes, für die Berechnung von Seiltrieben mit Stahl-Seilrollen geeignetes, Verfahren auf die Berechnung von Seiltrieben mit Kunststoff-Seilrollen und zunächst einlagigen Rundlitzenseilen erweitert.

Dem Vorteil der vergrößerten Drahtseil-Betriebsdauer infolge des Laufes über Kunststoff-Seilrollen steht der Nachteil des Versagens des Ablegekriteriums “äußerlich sichtbare Drahtbruchzahl“ gegenüber. Um den Betriebsdauervorteil infolge des Einsatzes von Kunststoff-Seilrollen dennoch ohne Sicherheitsverlust nutzen zu können, wird eine Echtzeit-Schadensakkumulation vorgeschlagen.

Der Betriebsdauervorteil infolge des Einsatzes von Kunststoff-Seilrollen zahlt sich vor allem bei Kranen aus, die das Seil einlagig aufwickeln, also z. B. bei Brücken- und Portalkranen. Auch bei Tagebaugroßgeräten kommt der Betriebsdauervorteil zum Tragen, da diese das Seil ebenfalls einlagig aufwickeln. Selbst die Dem Vorteil der vergrößerten Drahtseil-Betriebsdauer infolge des Laufes über Kunststoffrollen verhältnismäßig großen Durchmesser der auf Tagebaugroßgeräten eingesetzten Seile stellen den Einsatz von Kunststoff-Seilrollen nicht in Frage. Relevant sind auch durch Treibscheiben angetriebene Seiltriebe, z. B. Aufzüge.

Literatur

- [Barthel06] Marquardt, H.-G.; Barthel, T.: Betriebsdauerzuwachs für Drahtseile. IN: Hebezeuge und Fördermittel, Berlin 46 (2006) 11, S. 548 – 551
- [Both01] Both, C.: Entwicklung eines Verfahrens zur Beurteilung des Schädigungszustandes von Schrägaufzugseilen an Hochöfen mittels magnetinduktiver Streuflussmessung. Universität Duisburg, Dissertation 2001
- [Feyrer97] Feyrer, K.: Drehverhalten von Spiralrundlitzen-Seilen. IN: Draht, Bamberg 48 (1997) 2, S. 34 – 36
- [Feyrer00] Feyrer, K.: Drahtseile - Bemessung, Betrieb, Sicherheit. Berlin [u.a.]: Springer-Verlag, 2000
- [Häberle95] Häberle, B.: Pressung zwischen Drahtseil und Seilscheibe. Universität Stuttgart: Dissertation 1995.
- [Haibach89] Haibach, E.: Betriebsfestigkeit – Verfahren und Daten zur Bauteilberechnung. Düsseldorf : VDI-Verlag, 1989
- [OIPEEC] OIPEEC-Recommendation Nr. 1-6. OIPEEC Bulletin 56, Torino, 15.11.1988, S. 25-30
- [SR_Aufzüge] Seilrollen aus Kunststoff, Sicherheitstechnische Richtlinien für Aufzüge, Juli 1986
- [Steinbach04] Steinbach, G.: Berechnung der Betriebsdauer von Drahtseilen in Seiltrieben. Technische Überwachung, Düsseldorf (2004) 4, S. 27 – 31
- [Wünsch91] Wünsch, D.; Liesenfeld, G.; Schlecht, B.: Seiltriebe praxisgerecht überwachen. IN: F+H Fördern und Heben, Berlin 41 (1991) 4, S. 301 – 308