

Lebensdauer kunststoffummantelter Drahtseile

Lifetime of plastic coated wire ropes

**Toni Recknagel
Thorsten Schmidt**

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

Stahldrahtseile übernehmen in vielen Bereichen der Fördertechnik wichtige Aufgaben. In ihrer Funktion als laufende Seile unterliegen die Seildrähte auf Grund der Beanspruchung aus Zug-, Druck- und Biegespannungen beim Abrollvorgang über die Seilscheiben der Ermüdung. Im Zusammenspiel mit Reibverschleiß und weiteren Einflüssen haben sie eine begrenzte Lebensdauer und sind niemals als dauerhaft zu betrachten. Um die Gefahr für Mensch und Maschine nahezu auszuschließen, dürfen Stahldrahtseile nicht bis zum Ende ihrer Lebensdauer in praktischen Anwendungen eingesetzt werden. Die Lebensdauer eines Seiles wird durch sein Versagen, den Seilriss, definiert. In aktuellen Normungen werden Kriterien der Ablegereife eines konventionellen Drahtseiles festgesetzt, um den Austausch des geschädigten, aber noch intakten Seiles rechtzeitig zu gewährleisten. Aktuelle Praxiserfahrungen zeigen, dass neuartige Seilkonstruktionen mit einer Kunststoffummantelung des Drahtseiles eine wesentliche Verlängerung der Betriebs- und Lebensdauer aufweisen als herkömmliche Seile ohne Ummantelung. Bisherige Normen sowie rechnerische Methoden zur Abschätzung von Betriebs- und Lebensdauer laufender Drahtseile lassen jedoch eine sinnvolle Betrachtung der Seile mit Kunststoffummantelung nicht zu und müssen entsprechend angepasst und erweitert werden. Mit Hilfe von Dauerbiegeversuchen kann die Betriebs- und Lebensdauer von Seilen experimentell unter idealen Bedingungen untersucht und eingeschätzt werden. Durch komplexe FE-Modelle werden die Beanspruchungszustände im Drahtseil sowie der Einfluss der Kunststoffummantelung simuliert und wichtige Erkenntnisse zum Verhalten des Seiles gewonnen.

[Schlüsselwörter: Stahldrahtseil, Kunststoffummantelung, Ablegereife, Lebensdauer, Dauerbiegeversuche]

Steel wire ropes perform key functions in many fields of material handling. The single strands are subject to mechanical loads due to tension, compression and bending stresses in its function as running wire ropes. During the rolling movement over a rope sheave the wire rope is fatigued. Combined with the rubbing wear and

other influencing factors wire ropes have a limited lifetime. Therefore, steel wire ropes are not considered as fatigue durable. Wire ropes must not be applied in the industrial application until reaching the end of its lifetime to avoid any danger for people and machinery. The lifetime of a rope is defined until rope or strand fracture. Current standards include discard criteria for conventional steel wire ropes to ensure the replacement of the damaged wire rope before rope failure. Current practical experiences have shown that innovative rope construction with plastic coating extend the service time and lifetime compared to conventional ropes without coating. Existing standards and mathematical approaches for estimating the service time and lifetime do not allow consideration of plastic coated ropes. Therefore, the standards and methods must be adapted and extended. The service life and lifetime of running wire ropes can be experimentally investigated by means of bending fatigue test. Complex stress conditions within a wire rope and the influence of the plastic coating can be simulated with the help of finite element analysis. This provides important knowledge about the rope behaviour during its performance.

[Keywords: wire rope, plastic coating, discard criteria, lifetime, bending fatigue test]

1 MOTIVATION

Stahldrahtseile sind seit vielen Jahrzehnten wichtiger Bestandteil fördertechnischer Maschinen. Als beständige Maschinenelemente haben sie sich in den industriellen Anwendungen bewährt und etabliert. Die praktischen Anwendungsfälle eines Stahldrahtseiles unterliegen der stetigen Weiterentwicklung. Dies führt auch zu steigenden Anforderungen an die Seile. Um den Einfluss kleinster Veränderungen der Seilstruktur auf die Betriebs- und Lebensdauer eines Seiles zu überprüfen, ist die Fertigung sowie die Testung der modifizierten Konstruktion notwendig. Per Dauerbiegeversuch können diese Zeiteinheiten schneller als in der realen Anwendung untersucht werden. Des Weiteren bietet die Simulation mittels der Finite-Elemente-Methode die Möglichkeit der Betrachtung und Beurteilung

der meistgeschädigten Seilbereiche, welche in experimentellen Untersuchungen nicht zugänglich sind. Die gewonnenen Erkenntnisse sollen in rechnerischen Abschätzungsansätzen zur Betriebs- und Lebensdauer sowie in Normenerweiterungen zum Einsatz kommen.

2 STAND DER FORSCHUNG

Stahldrahtseile finden als laufende Seile Verwendung in zahlreichen praktischen Anwendung. Sie werden u.a. im Bergbau, Aufzugsbau und Kranbereich eingesetzt. Je nach Einsatzgebiet unterscheiden sie sich bezüglich ihres Durchmessers, ihrer Konstruktionsform und in der Anzahl und Struktur ihrer Außenlitzen. Der folgende Beitrag untersucht explizit Kranseile. Diese erfüllen in der Anwendung die Aufgabe der Güterbewegung. Durch das Heben und Senken von Lasten sowie durch die Änderung der Zugkraftrichtung beim Lauf über Seilscheiben unterliegen die Seile hohen Belastungen. Neben der Zugbelastung entlang der Seillängsachse werden die Seile durch den Abrollprozess auf einer Seilscheibe zusätzlich einer Biege- und Druckbeanspruchung ausgesetzt [VDI12].

Die zeitliche Einordnung der Anwendungsdauer eines Drahtseiles lässt sich in zwei Bereiche gliedern. Auf Grund sicherheitsrelevanter Aspekte darf ein Drahtseil nicht bis zum Versagenseintritt genutzt werden. Die Betriebsdauer definiert den Einsatzzeitraum eines Seiles in der Anlage. Dieser Bereich wird durch das Erreichen der Ablegereife eingegrenzt. Die Ablegereife beschreibt die ertragbare Lastwechselzahl bis zu einem zulässigen Schädigungsgrad des Seiles [Jeh85]. Spezifische Ablegekriterien sind die zulässige Anzahl sichtbarer Drahtbrüche innerhalb einer definierten Länge, Durchmesserreduktion und Korbbildung [ISO13]. Die Lebensdauer eines Stahldrahtseiles charakterisiert die Zeitspanne bis zum Eintreten eines Versagenskriteriums. Durch einen Litzenbruch oder den kompletten Seilriss kann das Maschinenelement seine angedachte Aufgabe nicht mehr bewerkstelligen. Es entstehen ernstzunehmende Gefahren für Mensch und Maschine, wenn das Drahtseil über den Zeitpunkt des Erreichens der Ablegereife im Einsatz bleibt [Jeh85].

Die Betriebs- und Lebensdauer eines Drahtseiles kann durch Dauerbiegewechselversuche experimentell bestimmt werden. Neben der spezifischen Seilkonstruktion bilden die Seilzugkraft und das Verhältnis des Scheibendurchmessers zum Seilnennndurchmesser (D/d -Verhältnis) die wichtigsten Einflussparameter. Die Durchführung dieser Versuche ist zeit- und kostenintensiv. Im Rahmen der universitären Forschung wurden analytische Abschätzungsverfahren zur Bestimmung der Betriebs- und Lebensdauer entwickelt. In der Praxis haben sich die Methoden „Leipzig“ (nach Jehmlich) und „Stuttgart“ (nach Feyrer) etabliert. Beide Ansätze beruhen auf umfangreichen Testreihen [VDI12]. Die Ergebnisse der Dauerbiegewechselversuche an der Universität Stuttgart sind von Feyrer statistisch durch Regressionsrechnungen ausgewertet worden.

Mittels spezifischer Regressionsfaktoren kann die Lebensdauergleichung für die entsprechenden Seilkonstruktionen angewendet werden [Fey00]. Der Ansatz der Methode „Leipzig“ nutzt das mechanische Modell der Drahtbeanspruchung als Kalkulationsgrundlage. Das Abschätzungsverfahren berücksichtigt die auftretenden Zug-, Biege- und Druckspannungen, die im Seil beim Lauf über eine Seilscheibe auftreten. Des Weiteren unterscheidet der Ansatz zwei Schädigungsbereiche des Seiles. Der äußere Schädigungsbereich ist definiert durch den Kontakt der Außenlitzen mit der Seilscheibe. In dieser Zone treten auch die sichtbaren Drahtbrüche auf, welche nach gängigen Normen als Ablegekriterium gelten. Zusätzlich betrachtet die Methode „Leipzig“ den Kontakt der Außenlitzen zur Seileinlage als inneren Berührungsbereich. Schädigungen in dieser Zone werden von der Norm bisher vernachlässigt. Die innere Schadensentwicklung kann allerdings durchaus zum frühzeitigen Versagen des Seiles beitragen [Jeh85]. Beide Methoden können keine äußeren Einflüsse, wie Korrosion oder Verunreinigungen im Seiltrieb, berücksichtigen. Aus diesem Grund gelten beide Methoden zur Abschätzung der Betriebszeiten und zur Einteilung von Inspektionsintervallen zur manuellen Schadensüberwachung des Seiles. Sie ersetzen keinesfalls die regelmäßige Wartung und Inspektion [Ste09].

In der analytischen Berechnung von Spannungen, die an einem Drahtseil während des Laufes über eine Seilscheibe auftreten, sind Annahmen und Idealisierungen nicht zu vermeiden. Die Grenzen der Analytik werden durch die komplexe Geometrie, den im Seil auftretenden Nichtlinearitäten, den Kontaktbedingungen, dem Materialverhalten und dem Auftreten mehrachsiger Spannungszustände gesetzt. Auf Grund dieser Komplexität kommen für die Berechnung nur numerische Lösungsverfahren in Frage [Zie07]. Die Finite-Elemente-Methode wird seit den 1990er Jahren in der Seiltechnik angewandt. Durch die zu dieser Zeit beschränkte Rechentechnik konnten anfänglich nur kurze Seilabschnitte simuliert werden. Komplexe Beanspruchungen, die sich auf Grund der Zug- und Biegebelastung des Seiles im Einsatz einstellen, benötigen idealerweise längere Seilmodelle, um einen von Randbedingungen ungestörten Bereich in der Modellmitte zu erhalten [Wei15]. Mit der Weiterentwicklung der Rechentechnik und -leistung konnten auch entsprechende dreidimensionale Seilmodelle simuliert werden. Dennoch beschränkt sich das Versuchsmodell zumeist auf ein einlagiges Spiraldrahtseil unter Zugbelastung, an welchem Kontakt- und Axialspannungen untersucht wurden [Weh03]. Die Zug-Biegebelastung von Litzen und einfachen Litzenseilen wird zunächst von [Wit07] untersucht. Auf Grund noch unzureichender Rechenleistung konnten die Modelle nur mit nicht ausreichender Vernetzung simuliert werden. Als Folge kommt es zur Überlagerung der Kontaktspannungen bei hohen Biegekräften und relativ geringen Zugkräften. 2015 wird durch [Wei15] eine Parameterstudie der Kontaktspannungen in zugbelasteten Drahtseilen veröffentlicht. Das Hauptaugenmerk seiner Arbeit liegt auf der

umfangreichen Modellierung von Belastungs- und Randbedingungen sowie auf Kontaktbedingungen unter der Berücksichtigung von Nichtlinearitäten. [Wei15] bezieht die Pressungen an den Kontaktstellen ein und schafft eine weitere Möglichkeit zur Beurteilung der Seilbeanspruchung.

3 EXPERIMENTELLE UNTERSUCHUNGEN

Im Rahmen eines aktuell laufenden Forschungsprojektes an der Technischen Universität Dresden wird der Einfluss einer zusätzlichen Kunststoffummantelung eines konventionellen Drahtseiles auf die Betriebs- und Lebensdauer untersucht. Die experimentellen Untersuchungen erfolgen vorrangig als Dauerbiegewechselversuch.



Abbildung 1. Prüfseile a) konventionelles Drahtseil
 b) transparent ummanteltes Drahtseil
 c) schwarz ummanteltes Drahtseil

Das konventionelle Stahldrahtseil ist in Abbildung 1a dargestellt. Diese Seilkonstruktion wurde in einem weiteren Produktionsschritt mit zwei unterschiedlichen Kunststoffen ummantelt, siehe Abbildung 1b und 1c. Das vorliegende Litzenseil besteht aus einem unabhängig verseilten Kern (IWRC) mit einer Einfachlitze als Kernlitze und sechs weiteren Einfachlitzen in der ersten Litzenlage. Die Außenlitzenlage wird durch sechs Litzen in Warrington-Seale-Konstruktion mit 26 Einzeldrähten gebildet, siehe Abbildung 2a. Diese Parallelschlaglitzen bestehen aus mehreren Drahtlagen, welche um einen Kerndraht gewickelt sind. Alle Drahtlagen haben dabei die gleiche Schlaglänge, wodurch die Drähte der aufeinanderliegenden Drahtlagen parallel verlaufen. Durch diese Konstruktion entsteht ein linienförmiger Kontakt zwischen den Lagendrähten der Außenlitzen und es wird eine gleichmäßige Lastverteilung sichergestellt. Abbildung 2b zeigt den Querschnitt der Versuchsseile mit Kunststoffummantelung. Im gefertigten Drahtseil sind die Abstände zwischen den Außenlitzen auf Grund des Schlages deutlich geringer. Diese Sperrung verhindert ein tiefgehendes Eindringen des Kunststoffes in die Litzenassen.

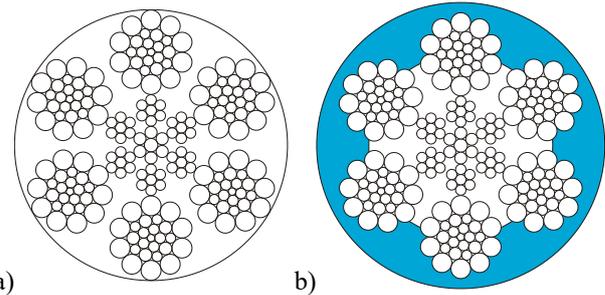


Abbildung 2. Seilquerschnitte
 a) konventionelles Drahtseil
 b) kunststoffummanteltes Drahtseil

3.1 DAUERBIEGEWECHSELVERSUCHE

Die Dauerbiegewechselversuche fanden an dem Seilprüfstand der Technischen Universität Dresden statt. Die schematische Darstellung ist in Abbildung 3 gezeigt. Die Seilzugkraft wird über einen hydraulischen Spannzylinder auf das Prüfseil aufgegeben. Eine Treibscheibe bewegt das Drahtseil in definierten Grenzen über die Seilrollen. Durch eine konstruktiv günstige Gestaltung des Prüfstandes durchlaufen drei unabhängige Seilabschnitte jeweils eine Seilscheibe. Damit können am Prüfseil drei Biegezone untersucht werden und mit einem Versuchsdurchlauf mehrere statisch auswertbare Ergebnisse generiert werden. In der dargestellten Versuchsanordnung werden ausschließlich Einfachbiegewechsel untersucht.

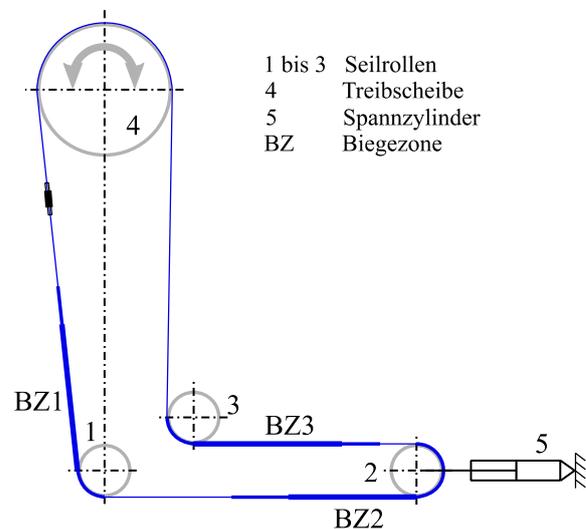


Abbildung 3. Schematische Darstellung des Seilprüfstandes an der Technischen Universität Dresden

Zur Bewertung des Einflusses der Kunststoffummantelung eines Drahtseiles auf die Betriebs- und Lebensdauer werden sowohl die kunststoffummantelten Prüfseile als auch die konventionellen Prüfseile experimentell untersucht. Abbildung 4 zeigt den Versuchsplan der Testreihe. Die ummantelten Seile werden auf bei D/d-Verhältnissen

getestet. Jedes Durchmesser Verhältnis wird mit zwei Laststufen durchfahren. Das konventionelle Drahtseil wird zur Vergleichswerterzeugung zunächst nur bei dem kleinsten D/d-Verhältnis untersucht. Auf Grund der zusätzlichen Kunststoffschicht ändert sich der Außendurchmesser des ummantelten Seiles. Die Biegebelastung des Stahldrahtseiles entspricht dem gleichen D/d-Verhältnis wie beim konventionellen Seil.

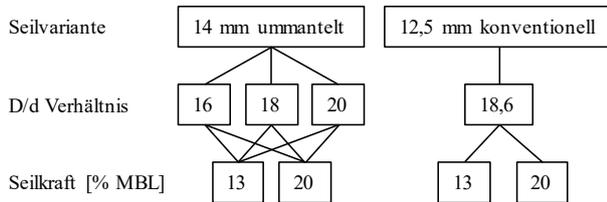


Abbildung 4. Versuchsplan der Dauerbiegewechselversuche

Das Erreichen der Grenzzahl äußerer sichtbarer Drahtbrüche in einer definierten Länge gilt als Ablegekriterium für konventionelle Drahtseile. Bei der Durchführung der Dauerbiegewechselversuche dieser Seile konnte die bis zum Erreichen der Abergereife ertragene Biegewechselzahl bestimmt werden. Auf Grund des Kunststoffes ist eine visuelle Seilinspektion bei den ummantelten Prüfseilen nicht möglich. Magnet-Induktive-Prüfmethoden stehen aktuell nicht zur Verfügung. Daher werden die ummantelten Drahtseile in einem weiteren Dauerbiegewechselversuch bis zu einer definierten Grenzbiegewechselanzahl, welche sich aus den Erfahrungen der konventionellen Seile sowie einem rechnerischen Überschlag der Betriebsdauer ergibt, gefahren. In nachfolgenden Untersuchungen wird der Schädigungsgrad des Seiles beim Erreichen der Grenzbiegewechselzahl mit dem der vollständig bis zum Erreichen der Lebensdauer geprüften Seile sowie der konventionellen Prüfseile verglichen.

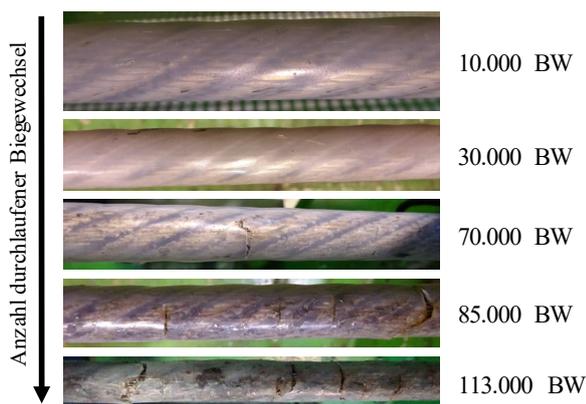


Abbildung 5. Zustand der Kunststoffummantelung während des Dauerbiegewechselversuches

Aus der in Abbildung 4 prozentual angegebenen Seilskraft bezüglich der Mindestbruchkraft (MBL) ergeben sich die Prüfparameter der Seilskraft $S = 15 \text{ kN} / 22,4 \text{ kN}$. Die nachfolgend vorgestellten Ergebnisse beziehen sich auf das D/d-Verhältnis $D/d = 16$ für die kunststoffummantelten

Prüfseile sowie $D/d = 18,6$ für das konventionelle Drahtseil. Während der Durchführung der Dauerbiegewechselversuche wurde der Zustand der Kunststoffummantelung regelmäßig geprüft. Mit steigender Biegewechselzahl kam es zunächst zu Umfangsrissen an der Ummantelung bis hin zur kompletten Ablösung des Kunststoffmantels vom Drahtseil. Abbildung 5 zeigt den Verlauf des Zustandes des Kunststoffs exemplarisch für die transparente Variante. Entsprechend den ursprünglichen Außendurchmessern der Prüfseile haben die Seilscheiben für die ummantelten Seile eine andere Rillengröße als für die konventionellen Seile. Mit dem Versagen des Mantels kommt es zum Stahl/Stahlkontakt zwischen Drahtseil und Seilscheibe sowie zu einem ungünstigen Verhältnis zwischen Rillenradius und Seildurchmesser. Um diesen Aspekt mit in die Versuchsauswertung einbeziehen zu können, wurde das konventionelle Seil in einem zusätzlichen Versuchsdurchlauf auf der ungünstigen Rillung getestet. Abbildung 6 zeigt die Lebensdauerergebnisse der getesteten Seile für die niedrigere Laststufe. Die geringste Lebensdauer erreichte der Versuch des konventionellen Seiles mit ungeeigneter Rillung der Seilscheiben. Das Ergebnis des nicht ummantelten Seiles in Kombination mit dem Rillenradius $r = 6,5 \text{ mm}$ gilt als Referenzwert für die ummantelten Prüfseile. In den Versuchen des ersten Lasthorizontes ergibt sich eine Lebensdauererlängerung von ca. 30 % (schwarzer Kunststoff) bzw. von ca. 60 % (transparenter Kunststoff). Die offensichtlichen Unterschiede, die sich auf Grund der unterschiedlichen Kunststoffe ergeben sind nicht Gegenstand des aktuellen Forschungsprojektes, bieten allerdings Ansatzpunkte für zukünftige Untersuchungen.

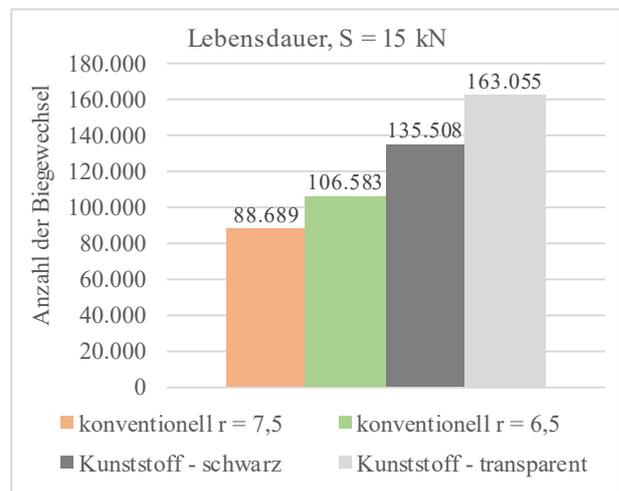


Abbildung 6. Lebensdauerergebnisse der Dauerbiegewechselversuche mit Seilkraft $S = 15 \text{ kN}$

Die Dauerbiegewechselversuche für den zweiten Lasthorizont wurden ausschließlich mit der optimalen Seilscheibenrillung für das jeweilige Prüfseil durchgeführt. Die erreichte Lebensdauer des konventionellen Seiles gilt als Referenz für die Ergebnisse der beiden kunststoffummantelten Drahtseile. Auf Grund der Ummantelung des Litzenseiles mit dem schwarzen Kunststoff lässt sich eine

Verlängerung der Lebensdauer um ca. 55 % feststellen. Durch den Einsatz des transparenten Kunststoffes erfolgt sogar eine Lebensdauererweiterung um ca. 90 %. Abbildung 7 fasst die Ergebnisse der zweiten Laststufe zusammen.

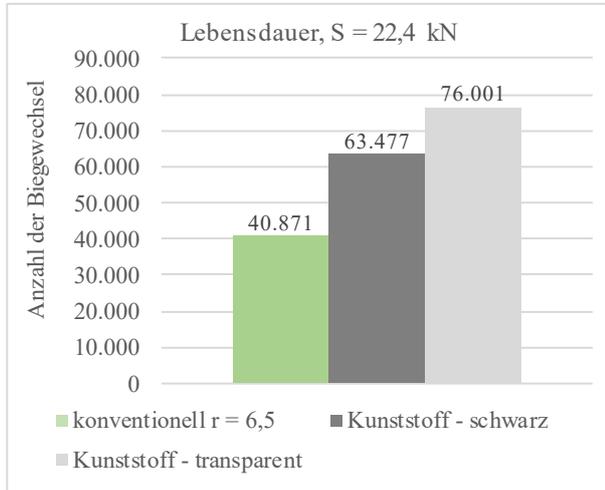


Abbildung 7. Lebensdauerergebnisse der Dauerbiegeversuche mit Seilkraft $S = 22,4 \text{ kN}$

Es kann festgestellt werden, dass die Kunststoffummantelung mit steigender Last einen erhöhten Einfluss auf die Lebensdauer des Drahtseiles hat. Die Untersuchung weiterer D/d-Verhältnisse mit den entsprechenden Laststufen ist aktuell Bestandteil des Forschungsvorhabens.

3.2 NACHUNTERSUCHUNGEN

Im Anschluss an die Dauerbiegeversuche wird jede Biegezone eines jeden Prüfseiles einer umfangreichen Nachuntersuchung unterzogen. Dabei wird auch die Kunststoffummantelung betrachtet. Auf Grund der Quetschung zwischen Seil und Scheibe beim Lauf über die Seilrollen kommt es zu einer laufseitigen Abnutzung der Ummantelung. Die Biegung hat keinen augenscheinlichen Einfluss auf das Ermüdungsverhalten des Kunststoffes.

Die Untersuchung der Stahldrahtseile erfolgt in mehreren Schritten. Nach der Befreiung von Schmiermitteln wird der äußere Zustand der Seile begutachtet. Der Zustand der Prüfseile, die bis zu einer definierten Biegewechselzahl gefahren wurden, bei welcher die Kunststoffummantelung noch vollständig intakt war, kann mit dem Zustand der konventionellen Seile verglichen werden. Ein Vergleich der Drahtbruchentwicklung während des Versuchsverlaufs ist nicht möglich, da die Ummantelung die Detektion der äußeren Drahtbrüche verhindert. Es ist festzustellen, dass die konventionellen Seile, die einem dauerhaften Stahl/Stahl-Kontakt zwischen Seilscheibe und Außenlitzen ausgesetzt sind eine höhere äußere Schädigung ausweisen. Um den Schädigungszustand im Seilinneren zu begutachten, werden die einzelnen Außenlitzen vom Gesamtseil gelöst und gereinigt. Die innere nicht sichtbare Schädigung des Seiles

wird aktuell nicht als Ablegekriterium betrachtet, da sie während des Einsatzes des Seiles nicht überprüft werden kann. Erfahrungen zeigen, dass die innere Schädigung zum Versagen des Seiles führen kann bevor äußere Ablegekriterien die Einsatzzeit beenden. Aus diesem Grund wurden die geprüften Seillitzen auf sichtbare und nicht sichtbare Drahtbrüche untersucht, siehe Abbildung 8. Es zeigen sich zwei Formen der nicht sichtbaren Drahtbrüche. Die klassischen inneren Drahtbrüche treten im Bereich des Kontaktes der Außenlitzenlage zur Seileinlage auf, siehe Abbildung 8b. In Abbildung 8c werden Drahtbrüche in den Kontaktstellen nebeneinanderliegender Außenlitzen gezeigt. Diese nicht sichtbaren Drahtbrüche in den Litzengassen entstehen durch eine unzureichende Sperrung.

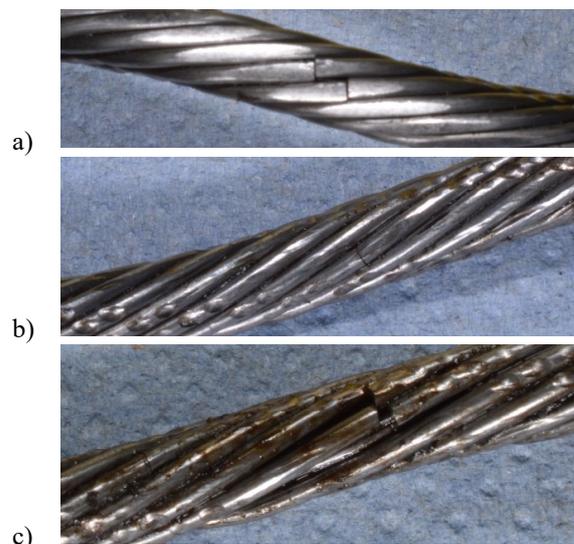


Abbildung 8. Drahtbrüche an den Außenlitzen der Prüfseile a) äußere sichtbare Drahtbrüche b) innere nicht sichtbare Drahtbrüche c) nicht sichtbare Drahtbrüche in den Litzengassen

Die Auswertung der Verteilung der Drahtbrüche an den Außenlitzen der Drahtseile zeigt, dass die kunststoffummantelten Seile prozentual weniger äußere Drahtbrüche aufweisen als die konventionellen Seile. Auf Grund der Ummantelung wird das Seil also äußerlich weniger stark geschädigt. Die innere Schädigung der kunststoffummantelten Seile nimmt zu. Dies gilt als Ansatz die nicht sichtbare Schädigung als Ablegekriterium in gängigen Normen zu etablieren.

4 FEM UNTERSUCHUNGEN

Der Einsatz der Finite-Elemente-Methode bietet die Möglichkeit zur Betrachtung von Drahtbeanspruchungen in Bereichen, die während experimenteller Untersuchungen nicht zugänglich sind. Auf Grund der Zug-, Biege- und Druckbelastung der einzelnen Seildrähte während eines Biegewechsels kommt es zur Ermüdung des Drahtes und schließlich zum Bruch. Durch eine zusätzliche Kunststoff-

fummantelung des Seiles bleiben die Zug- sowie Biegebeanspruchung der Seildrähte unverändert. Die durch die Seilscheibe hervorgerufene Druckbelastung muss sich auf Grund theoretischer Überlegungen ändern. Um die maximalen Drahtbeanspruchungen zu ermitteln wird aktuell ein zweidimensionales FE-Modell genutzt.

Im Rahmen der Untersuchung mit Hilfe des 2-D Modells wurde ein systematischer Aufbau der Seilkonstruktion vollzogen. Somit kann neben dem Gesamtseil auch die Betrachtung einzelner Bestandteile des Seiles erfolgen. Durch die Segmentbetrachtung mit reduziertem Modellumfang kann die Rechenzeit der Simulationsmodelle reduziert werden. Um den Einfluss der Kunststoffummantelung auf die Druckbeanspruchung der Seildrähte zu untersuchen werden konventionelles und ummanteltes Seil simuliert und miteinander verglichen.

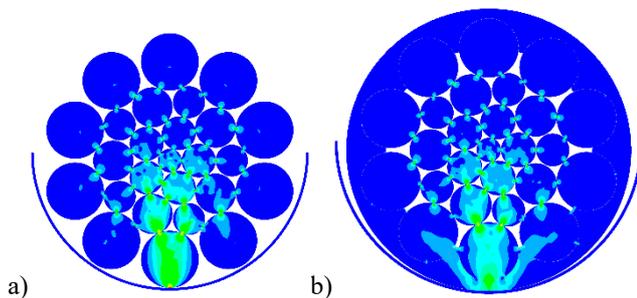


Abbildung 9. Ergebnis der FE-Simulation einer Warrington-Seale-Litze
 a) konventionelle Litze
 b) kunststoffummantelte Litze

Die Randbedingungen aus der Zugbelastung des Seiles werden analytisch bestimmt und in das Modell integriert. Somit wird der Zusammenhalt des zweidimensionalen Aufbaus gewährleistet. Die Druckbelastung wird durch eine starre Seilscheibe auf das Seilmodell aufgebracht. In Abbildung 9 sind die Simulationsergebnisse der FE-Rechnung für eine konventionelle und eine ummantelte Warrington-Seale-Litze dargestellt. Diese Konstruktion entspricht den Außenlitzen der experimentell untersuchten Prüfseile. Das auftretende Spannungsmaximum der konventionellen Litze befindet sich im Kontaktbereich des Außendrahtes zur Seilscheibe. Des Weiteren wird eine Spannungskonzentration zur unterliegenden Drahtlage festgestellt, siehe Abbildung 9a. Nach der Erweiterung des Litzenmodells um eine Kunststoffummantelung und der Belastung mit den gleichen Parametern ist eine breitflächige Verteilung der Druckspannungseinleitung zu erkennen. Durch den Kunststoff werden auch die benachbarten Drähte des ursprünglich in Kontakt befindlichen Außendrahtes beansprucht. Das Spannungsmaximum in diesem Bereich wird deutlich reduziert, siehe Abbildung 9b. Das globale Spannungsmaximum verschiebt sich vom äußeren Kontakt des Außendrahtes zur Seilscheibe in den Bereich der Berührung zwischen Außendraht und unterliegender Drahtlage.

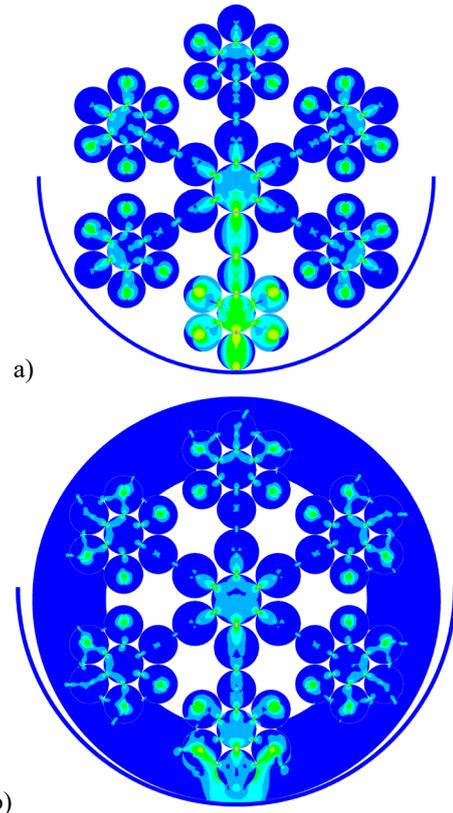


Abbildung 10. Ergebnis der FE-Simulation eines einlagigen Litzenseiles 6x7
 a) konventionelles Litzenseil
 b) kunststoffummanteltes Litzenseil

Das gleiche Vorgehen wurde in einer weiteren FE-Simulation auf ein einlagiges Litzenseil angewandt. Die in Abbildung 10 dargestellte Seilstruktur entspricht der Seileinlage des Prüfseiles. Auch in diesem Modell befindet sich das Spannungsmaximum im Bereich des Kontaktes zwischen Außendraht der Außenlitzenlage und der Seilscheibe, siehe Abbildung 10a. Des Weiteren ist die Interaktion der Außenlitzenlage zur Kernlitze erkennbar. In diesem Bereich ist die innere Seilschädigung zu erwarten. Die Kunststoffummantelung bringt auch im Litzenseil eine breitflächige Verteilung der Druckbeanspruchung. Zusätzlich ist auch eine Reduzierung der Beanspruchung zwischen Außenlitzenlage und Kernlitze festzustellen, siehe Abbildung 10b. Die vorgestellten numerischen Berechnungen wurden auch für das Modell des gesamten Litzenseiles durchgeführt. Aus Übersichtsgründen wird an dieser Stelle auf die Darstellung der Ergebnisplots verzichtet. Die FE-Modelle liefern qualitativ die gleichen Ergebnisse wie die reduzierten Modelle. Um weiterführend Erkenntnisse für die rechnerische Abschätzung der Betriebs- und Lebensdauer nach Methode „Leipzig“ zu gewinnen, wurden die Spannungsmaxima quantitativ verglichen.

5 FAZIT UND ZUSAMMENFASSUNG

Im Rahmen der Auswertung der FE-Simulationen der konventionellen und ummantelten Drahtseile ist eine Reduzierung des Spannungsmaximums an den kritischen Schädigungsbereichen festzustellen. Die lokale Position des Spannungspeaks verschiebt sich vom äußeren Kontakt des Seiles mit der Seilscheibe beim nicht ummantelten Seil zum Kontakt der Außendrähte der Außenlitzen zur unterliegenden Drahtlage der gleichen Litze bei der kunststoffummantelten Variante. Der Außendraht der Außenlitze bleibt somit das meistgeschädigte Element des Drahtseiles. Die Differenz der Spannungsmaxima an den unterschiedlichen Bezugspunkten gilt als Reduktion der maximalen Druckspannung infolge der Kunststoffummantelung des Seiles. In den FE-Modellen lässt sich so eine Verringerung der maximalen Druckbeanspruchung um ca. 38 % nachweisen. Die Zug- und Biegebeanspruchung der Seildrähte bleibt durch die Ummantelung des Seiles mit dem Kunststoff unverändert.

Die Betriebs- und Lebensdauer der konventionellen Drahtseile lassen sich durch den rechnerischen Ansatz der Methode „Leipzig“ abschätzen. Diese Werte gelten als Grundlage zur weiteren Betrachtung. Wenn das Kalkulationsmodell mit Hilfe eines gesonderten Korrekturfaktors für die Ummantelung bei der Berechnung der Druckbeanspruchung der Seildrähte erweitert wird, kann der Einfluss des Kunststoffes in das gängige Abschätzungsverfahren der Betriebs- und Lebensdauer integriert werden. Der Korrekturfaktor entspricht der simulativ im FE-Modell gewonnenen Reduzierung der Druckspannung. Unter Verwendung der gegebenen konstruktiven Abmessungen des vorliegenden Untersuchungsseiles sowie der Parameter des Seiltriebes erhöht sich die Abschätzung der Betriebs- und Lebensdauer um ca. 40%. Dieser Wert lässt sich qualitativ auch durch die experimentellen Untersuchungen im Dauerbiege-wechselversuch nachweisen.

Im Rahmen der laufenden Untersuchungen wird noch nicht auf die materialwissenschaftliche Zusammensetzung des Kunststoffes eingegangen. Die Eignung und qualitativen Unterschiede des Werkstoffes sind entscheidend für seinen Einfluss auf die Betriebs- und Lebensdauer des ummantelten Drahtseiles. Des Weiteren hat auch die Dicke der Kunststoffschicht sowie seine Haftung am Seil eine nicht zu vernachlässigende Gewichtung bei der Lebensdauererlängerung. Diese und weitere Überlegungen sind Gegenstand der zukünftigen Forschung an der Technischen Universität Dresden.

LITERATUR

- [Fey00] Feyrer, K.: *Drahtseile – Bemessung, Betrieb, Sicherheit*. 2. Auflage, Berlin: Springer-Verlag, 2000
 ISBN 978-3-642-63531-1
- [ISO13] DIN ISO 4309: *Krane – Drahtseile – Wartung und Instandhaltung, Inspektion und Ablage*. Berlin: Beuth Verlag, 2013
- [Jeh85] Jehmlich, G.: *Anwendung und Überwachung von Drahtseilen*. 1. Auflage, Berlin: VEB Verlag Technik Berlin, 1985.
- [Ste09] Steinbach, G.: *Drahtseile in Seiltrieben – Betriebsdauer, Schädigung und Inspektion*. Verein für Technische Sicherheit und Umweltschutz e.V. (TSU), 17. Kranfachtagung – Technische Universität Dresden, 2009
- [VDI12] VDI 2358: *VDI-Richtlinie – Drahtseile für Fördermittel*. Berlin: Beuth Verlag, 2012
- [Weh03] Wehking, K.-H.; Ziegler, S.: *Berechnung eines einfachen Seils mit FEM*. DRAHT 5/2003 S. 32-36
- [Wei15] Weiß, J. C.: *Parameterstudie der Kontaktspannungen in zugbelasteten Drahtseilen basierend auf der Finite-Elemente-Methode*. Dissertation, Universität Stuttgart, 2015
- [Wit07] Witt, R.: *Modellierung und Simulation der Beanspruchungen von Zugsträngen aus Stahllitze und Zahnriemen*. Dissertation, Technische Universität Dresden, 2007
- [Zie07] Ziegler, S.: *Einfluss der Drahtschwingfestigkeit auf die Lebensdauer von Drahtseilen*. Dissertation, Universität Stuttgart, 2007

Dipl.-Ing. Toni Recknagel, research assistant at the Chair of Logistics Engineering, Institute of Material Handling and Industrial Engineering, Dresden University of Technology

Toni Recknagel is research assistant at the Chair of Logistics Engineering since 2017. Between 2009 and 2017 he studied mechanical engineering at the Dresden University of Technology. During his time as research associate he is charged with a research project about lifetime of plastic

coated wire ropes. Furthermore, he investigates the bending fatigue and other general behaviors of running steel wire ropes.

Address: Technische Universität Dresden, Faculty of Mechanical Science and Engineering, Institute of Material Handling and Industrial Engineering, Chair of Logistics Engineering, 01062 Dresden, Germany.
Phone: +49 351 463 34222
Fax: +49 351 463 35499
E-Mail: toni.recknagel@tu-dresden.de

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

Thorsten Schmidt is full professor at the TU Dresden and heads the Chair of Material Handling in the Mechanical Engineering faculty since 2008. He holds a diploma degree in mechanical engineering from the TU Dortmund and a Master degree in industrial engineering from the Georgia Institute of Technology. He received his Ph.D. from the TU Dortmund in 2001. His research areas are the design and optimization of facility logistics and production systems including a focus on the machinery and components involved. He currently works on energy efficient control strategies in material flow, fast approximation in early planning stages by means of standard design modules, online data analysis, formal verification of control logic, performance analysis of decentral and selfcontrolled systems, lightweight structures in material handling and stress analysis on wire ropes and toothed belts, respectively.

Address: Technische Universität Dresden, Faculty of Mechanical Science and Engineering, Institute of Material Handling and Industrial Engineering, Chair of Logistics Engineering, 01062 Dresden, Germany.
Phone: +49 351 463 32538
Fax: +49 351 463 35499
E-Mail: thorsten.schmidt@tu-dresden.de