

# Kunststoffummantelte Drahtseile: experimentelle, numerische und analytische Untersuchungen zur Lebensdauer

Plastic-coated wire ropes:  
experimental, numerical and analytical studies on lifetime

*Toni Recknagel,  
Thorsten Schmidt*

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

**K**unststoffummantelte Drahtseile zeichnen sich in der Praxis durch eine deutlich höhere Lebensdauer als konventionelle Drahtseile aus. Die Kriterien zum Wechsel geschädigter konventioneller Drahtseile sind in Normen für die entsprechende Gestaltungsstruktur des Seiles und des Seiltriebs festgelegt – für ummantelte Seile gibt es keine Standards. Wie die Normen zur Bestimmung der Ablegereife besitzen auch rechnerische Methoden zur Abschätzung der Lebensdauer keine Ansätze für kunststoffummantelte Drahtseile. In diesem Beitrag werden die experimentellen, numerischen und analytischen Untersuchungen zum Schädigungsverhalten des Drahtseiles bei zusätzlicher Kunststoffummantelung für eine gängige Seilkonstruktion vorgestellt sowie deren Berücksichtigung in der analytischen Lebensdauerabschätzung. Experimentelle Dauerbiegeversuche dienen zur praktischen Ermittlung der Lebensdauer bei unterschiedlichen D/d-Verhältnissen und Lasten. Die Beanspruchungen der Seildrähte, insbesondere die Druckbeanspruchung beim Lauf über Seilscheiben, wurden mittels der Finite-Elemente-Methode (FEM) untersucht. Das Belastungsszenario eines laufenden Drahtseiles beim Rollübergang über eine Seilscheibe wurde unter Verwendung der experimentell genutzten Parameter simuliert. Der Betrachtungsschwerpunkt lag hierbei auf der Änderung der Verteilung der Druckspannung in den Außendrähten der Seilkonstruktion infolge der Ummantelung. Durch die Erkenntnisse zur Druckspannungsverteilung in ummantelten Seilen aus den FE-Simulationen sowie durch die Ergebnisse der Dauerbiegeversuche wurde die Reduzierung der Druckspannung rechnerisch in eine Abschätzungsmethode eingepflegt. Es wurden Dauerbiegeversuche mit drei Seilvarianten durchgeführt. Dabei wurde die Lebensdauer der konventionellen Drahtseile mit der Lebensdauer der kunststoffummantelten Seile verglichen, um den Einfluss der Ummantelung auf den Lebensdauerzugewinn durch erreichbare

Biegewechsel experimentell zu bestimmen. Die numerischen Ergebnisse der Druckspannung konnten in den analytischen Ansatz der Lebensdauerabschätzung integriert werden und wurden durch die Versuchsdaten validiert. Im Beitrag wird gezeigt, dass eine zusätzliche Kunststoffummantelung des Drahtseiles einen erheblichen Lebensdauerzugewinn generiert. Im praktischen Einsatz kann so die Wirtschaftlichkeit von Anwendungen deutlich gesteigert werden.

*[Schlüsselwörter: Stahldrahtseil, Kunststoffummantelung, FEM, Lebensdauer, Dauerbiegeversuche]*

**P**lastic-coated wire ropes are characterised by a significantly longer lifetime than conventional wire ropes. The criteria for changing damaged conventional wire ropes are defined in standards for the corresponding design structure of the rope and the rope drive. There are no standards for coated ropes. Similar to the standards for the determination of discard state, theoretical methods for the estimation of lifetime do not have any approaches for plastic-coated wire ropes. This paper presents the experimental, numerical and analytical studies on the damage behaviour of the wire rope with additional plastic coating for an established rope construction as well as their consideration in the analytical lifetime estimation. Experimental bending fatigue tests were used to determine the lifetime at different D/d-ratios and loads. The stresses on the rope wires, in particular the compressive stress when running over sheaves, were investigated using the finite-element method (FEM). The load case of a running wire rope during the roll-over of a sheave was simulated using the experimentally used parameters. The focus here was on the change in the distribution of the compressive stress in the outer wires of the rope construction as a result of the coating. Based on the findings on the distribution of

**compressive stress in coated ropes from the FE-simulations and the results of the bending fatigue tests, the reduction of the compressive stress was integrated into an estimation method. Bending fatigue tests were performed with three rope variants. The lifetime of the conventional wire ropes was compared with the lifetime of the plastic-coated ropes in order to experimentally determine the influence of the coating on the increase in lifetime due to achievable bending cycles. The numerical results of the compressive stress could be integrated into the analytical approach of the lifetime estimation and were validated by the test data. The paper shows that an additional plastic coating of the wire rope generates a considerable increase in lifetime. In practical use, this can significantly increase the economic efficiency of applications.**

*[Keywords: wire rope, plastic coating, FEM, lifetime, bending fatigue test]*

## 1 MOTIVATION

Kunststoffummantelte Drahtseile werden in einigen Anwendungsfällen bereits eingesetzt. Dabei zeichnen sie sich in der Praxis durch eine deutlich höhere Lebensdauer als konventionelle Drahtseile aus. Die Kriterien zur Auswechslung geschädigter konventioneller Drahtseile sind in Normen festgelegt. In aktuellen Normen gibt es keine standardisierten Ablegekriterien für ummantelte Drahtseile. Seilhersteller geben Anwendungshinweise und Bewertungskriterien auf Grundlage eigener Untersuchungen. Die Einsatzgebiete eines Stahldrahtseiles unterliegen der stetigen Weiterentwicklung und bedingen steigende Anforderungen an die Seile. Neue Konstruktionen müssen einer umfangreichen Testung unterzogen werden, bevor sie sich auf dem Markt sicher etablieren können. Diese Untersuchungen sind auch notwendig, um das Leistungsniveau des Maschinenelements optimal ausnutzen zu können und zeitgleich Gefahren für Mensch und Maschine auf ein Minimum zu reduzieren. Durch Dauerbiegewechselversuche kann das Ermüdungsverhalten des Seiles deutlich schneller als in der praktischen Anwendung untersucht werden. Mittels FE-Simulationen kann die Beanspruchung innerhalb des Seiles betrachtet werden. Die Ergebnisse sollen der rechnerischen Abschätzung der Seillebensdauer dienen.

## 2 STAND DER FORSCHUNG

Stahldrahtseile werden als laufende Seile im Bergbau, Aufzugsbau und Kranbereich eingesetzt. Je nach Einsatzgebiet unterscheiden sie sich bezüglich ihrer Konstruktionsstruktur und Größe. Im folgenden Beitrag wird explizit ein gängiges Kranseil untersucht. Mit dem Ziel der Güterbewegung durch das Heben und Senken von Lasten sowie durch die Änderung der Zugkraftichtung beim Lauf über Seilscheiben unterliegen die Seile hohen

Belastungen. Die Zugbelastung erfolgt entlang der Seillängsachse. Zusätzlich werden die Seildrähte durch den Abrollprozess auf einer Seilscheibe einer Biege- und Druckbeanspruchung ausgesetzt [VDI12].

Die Belastung des Seiles führt zur Ermüdung der hochbeanspruchten Seildrähte. Um das Seil aus sicherheitsrelevanten Gründen nicht bis zum Versagenseintritt zu nutzen, ist der Einsatz nur bis zu einem zulässigen Schädigungsgrad in normativen Ablegekriterien festgelegt [Jeh85]. Für die Schädigungsarten z. B. Drahtbrüche pro definierter Länge, Litzenbrüche, Verformungen oder Korrosion, die während der Inspektion konventioneller Seile z. B. durch Sichtprüfung zu beurteilen sind, existieren derzeit keine standardisierten Ablegekriterien für kunststoffummantelte Drahtseile [ISO13]. Die Lebensdauer eines Stahldrahtseiles wird durch die Biegewechselzahl bis zum Eintreten eines Versagenkriteriums beschrieben. 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]. Dauerbiegewechselversuche dienen zur experimentellen Bestimmung der Betriebs- und Lebensdauer eines Drahtseiles. Auf Grund des Dauerbetriebs kann die Laufleistung eines Seiles im Laborbetrieb unter idealen Umständen und ohne äußere Einflüsse schneller als im praktischen Einsatz simuliert werden.

Trotz der Komprimierung der Versuchszeit sind die Dauerbiegewechselversuche zeit- und aufwandsintensiv. Im Rahmen der universitären Forschung wurden analytische Abschätzungsverfahren zur Bestimmung der Betriebs- und Lebensdauer entwickelt. In der Praxis haben sich die Methoden „Leipzig“ (nach Jehlich) 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]. Die Methode „Leipzig“ nutzt das mechanische Modell der Drahtbeanspruchung als Berechnungsansatz. Das Abschätzungsverfahren berücksichtigt die auftretenden Zug-, Biege- und Druckspannungen, die im Seil beim Lauf über eine Seilscheibe auftreten. Die spezifischen Faktoren (Konstruktions-, Litzen- und Berührungsfaktor) der Methode beruhen auf den geometrischen und werkstoffspezifischen Eigenschaften der Seilkonstruktion sowie des Seiltriebes. Die Betriebsdauerkonstante  $H$  sowie der Anstrengungsexponent  $CL$  wurden aus Regressionsrechnungen bestimmt. Somit lässt sich die Biegewechselzahl nach Gl. (1) und Gl. (2) bestimmen:

$$N = \frac{H}{y^{CL}} \quad (1)$$

$$y = \frac{1,04 \cdot \frac{S}{A} + \frac{0,6 \cdot E}{K^2 \cdot D/d} + \frac{K \cdot L \cdot B}{d} \cdot \sqrt{\frac{S}{D/d}}}{R} \quad (2)$$

<i>N</i>	Biegewechselzahl
<i>H</i>	Betriebsdauerkonstante
<i>C</i>	Anstrengungsexponent
<i>y</i>	Anstrengung
<i>S</i>	Seilzugkraft in N
<i>A</i>	Metallquerschnitt des Seils in mm <sup>2</sup>
<i>E</i>	Elastizitätsmodul des Seildrahtes in N/mm <sup>2</sup>
<i>K</i>	Konstruktionsfaktor
<i>D</i>	Scheibendurchmesser im Rillengrund in mm
<i>d</i>	Seilnennendurchmesser in mm
<i>L</i>	Litzenfaktor
<i>B</i>	Berührungsfaktor in $\sqrt{\text{N}}/\text{mm}^2$
<i>R</i>	Drahtnennfestigkeit in N/mm <sup>2</sup>

Der Ansatz unterscheidet zwei Schädigungsbereiche des Seiles. Der äußere Schädigungsbereich ist definiert durch den Kontakt der Außendrähte der Außenlitzen mit der Seilscheibe. In dieser Zone treten auch die sichtbaren Drahtbrüche auf, welche nach gängigen Normen als Ablegekritierium für konventionelle Seile 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, weil sie durch die visuelle Inspektion nicht überprüft werden können. Die Schadensentwicklung im Seilinneren 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].

Die komplexe Geometrie eines zweifach verseilten Drahtseiles sowie das nichtlineare Materialverhalten, diverse Kontaktbedingungen und das Auftreten mehrachsiger Spannungszustände setzen der analytischen Berechnung von Spannungen Grenzen. Idealisierungen und vereinfachende Annahmen sind nicht zu vermeiden. Zur Bewältigung der komplexen Herausforderungen werden vermehrt numerische Lösungsverfahren (Finite-Elemente-Methode – FEM) in der Seiltechnik angewandt [Zie07]. Die Historie des Modellumfangs ist stark an die Entwicklung der Rechentechnik gekoppelt. Mit steigenden Rechenkapazitäten konnte auch der Modellumfang erweitert werden, welcher idealerweise benötigt wird, um störende Einflüsse aus Randbedingungen zu vermeiden [Wei15]. Der dreidimensionale Modellaufbau umfasst meist ein einlagiges Spiraldrahtseil unter Zugbelastung, an welchem Kontakt- und Axialspannungen untersucht wurden [Weh03]. Die Zug-Biegebelastung von Litzen und einfa-

chen Litzenseilen wird zunächst von [Wit07] untersucht. In einer Parameterstudie untersucht [Wei15] die Kontaktspannungen in zugbelasteten Drahtseilen. Im Fokus stehen dabei die komplexen Belastungs-, Rand- und Kontaktbedingungen unter Berücksichtigung von Nichtlinearitäten.

### 3 EXPERIMENTELLE UNTERSUCHUNGEN

#### 3.1 EINFÜHRUNG

Im Rahmen der Untersuchungen an der Technischen Universität Dresden wurde der Einfluss einer zusätzlichen Kunststoffummantelung um ein konventionelles Drahtseil auf die Lebensdauer betrachtet. Die Konstruktionsstruktur des Drahtseiles besteht aus einem unabhängig verseilten Kern (IWRC) aus 6x7 Einfachlitzen sowie sechs Parallelschlaglitzen der Konstruktion 26-Warrington-Seale (Abbildung 1a). Zur Ummantelung des konventionellen Drahtseiles wurden zwei verschiedene Polyethylene verwendet (Abbildung 1b).

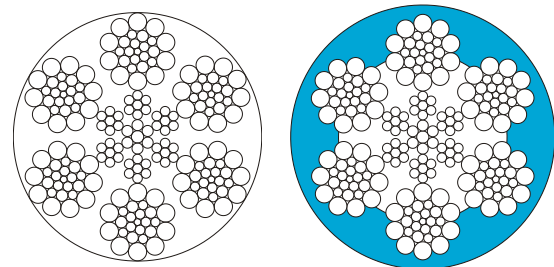


Abbildung 1. Konstruktion Prüfseile;  
 a) konventionelles Drahtseil;  
 b) kunststoffummanteltes Drahtseil

Grundlegend unterscheiden sich die Werkstoffe in ihrer Dichteigenschaften - ein Werkstoff mit hoher und ein Werkstoff mit niedriger Dichte. Optisch waren die Seile auf Grund der Kunststofffarbe zu unterscheiden. Die Benennung „Seilvariante 1“ bezeichnet den durchsichtigen/transparenten Kunststoff, „Seilvariante 2“ den schwarzen Kunststoff und „Seilvariante 3“ das nicht-ummantelte konventionelle Seil (Abbildung 2).



Abbildung 2. Prüfseile; a) Seilvariante 1;  
 b) Seilvariante 2; c) Seilvariante 3

Die Seilvariante 1 mit transparentem Kunststoffmantel sollte auf Eignung zur optischen Begutachtung des Schädigungszustandes geprüft werden. Es galt einzuschätzen, ob äußere Drahtbrüche unter der Kunststoffummantelung erkennbar sind. Diese gelten bei konventionellen Drahtseilen als Ablegkriterium [ISO13].

Die Dauerbiegewechselversuche wurden am Seilprüfstand der Professur für Technische Logistik (TLA) durchgeführt. Dieser Prüfstand verfügt über drei unabhängige Biegezone, in denen das Versuchsseil über Seilscheiben aus Stahl läuft (Abbildung 3). Die Belastung des Seiles erfolgt über eine hydraulische Spannvorrichtung, welche die variable Einstellbarkeit der Seilkraft  $S$  ermöglicht. Im Untersuchungsfall wurde die Einfachbiegung der Versuchsseile betrachtet.

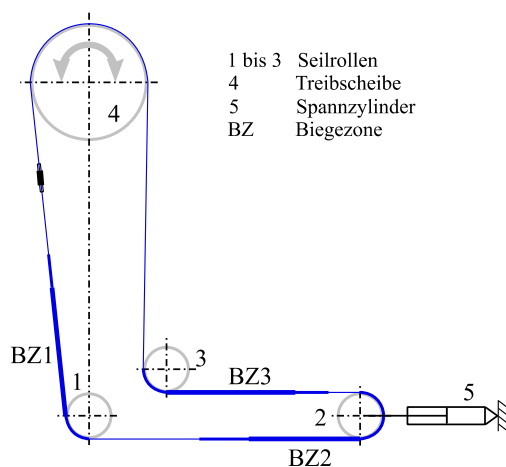


Abbildung 3. Schematische Darstellung des Seilprüfstandes

Während der Versuche wurde der Seilzustand regelmäßig überprüft. Bei konventionellen Drahtseilen wurde die Drahtbruchentwicklung der sichtbaren Drahtbrüche entsprechend über die Versuchsdauer dokumentiert. Zusätzlich wurden die Reduzierung des Seildurchmessers sowie die Seildehnung aufgenommen. Bei Versuchen mit ummantelten Drahtseilen wurde der Zustand des Kunststoffes während des Versuches dokumentiert. Bei allen drei eingesetzten Seilvarianten wurde die magnetinduktive Seilprüfung zur Erkennung von Drahtbrüchen eingesetzt. Im Anschluss an die Versuchsdurchführung wurde jedes Versuchsseil einer detaillierten Nachuntersuchung unterzogen. Dabei wurde die äußere Schädigung unter der ggf. noch vorhandenen Kunststoffhülle begutachtet. Zusätzlich wurden die Seile sukzessive zerlegt, um die Schädigung im Seilinneren bewerten zu können.

### 3.2 ERGEBNISSE DAUERBIEGEWECHSELVERSUCHE

Die experimentellen Untersuchungen der drei Seilvarianten wurden mit zwei Lasthorizonten durchgeführt. Dabei waren drei verschiedene D/d-Verhältnisse mit jedem Versuchsseil zu testen. Auf Grund der unterschiedlichen Außendurchmesser der konventionellen und umman-

telten Drahtseile unterscheidet sich die normgerechte Gestaltung der Rillengeometrie im entsprechenden Rillenradius  $r$  [DIN77]. Es wurde festgelegt, dass die entsprechende normgerechte Rillengeometrie der Seilscheiben für konventionelle Drahtseile nur bei einem der drei D/d-Verhältnisse zu überprüfen ist. Entsprechend der Literatur ist aus [Fey 00] bekannt, dass geringfügig zu große Rillenradien nur einen geringen negativen Einfluss auf die zu erwartende Biegezahl haben. Diese Anpassung des Versuchsplans sparte Seilressourcen, Seilscheiben und vor allem Versuchszeit. Abbildung 4 zeigt die erstellte Versuchsmatrix zur experimentellen Ermittlung der Lebensdauer konventioneller und kunststoffummantelter Drahtseile.

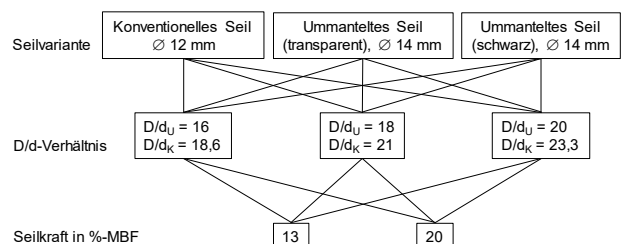


Abbildung 4. Versuchsmatrix der Dauerbiegewechselversuche

Die sichtbaren äußeren Drahtbrüche nach [DIN 4309] bildeten das Kriterium zur Bestimmung der Ablegereife der Versuchsseile. Bei jeder Inspektion wurden die Drahtbrüche in den Biegezone lokalisiert und dokumentiert. Abbildung 5 zeigt die Drahtbruchentwicklung exemplarisch am Versuch V21 mit dem konventionellen Drahtseil beim größten D/d-Verhältnis und der hohen Laststufe.

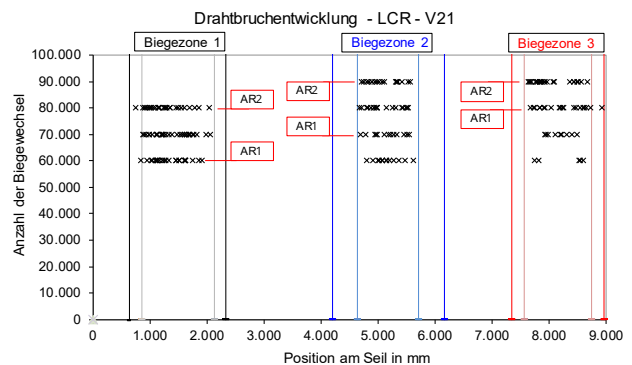


Abbildung 5: Drahtbruchentwicklung während des Dauerbiegeversuchs

Die Norm unterscheidet verschiedene Maschinenklassen je nach Spezifikation der Anwendung des Seiles in der Praxis. In diesem Bericht werden die Ablegkriterien der Maschinenklassen M1-M4 als „Ablegereife 1“ (AR1) bezeichnet. Die Ablegkriterien der Maschinenklassen M5-M8 werden „Ablegereife 2“ (AR2) genannt. Entsprechend der Anzahl der Einzeldrähte in der Außenlitztenlage der Seilkonstruktion wurde das Versuchsseil der Rope Category Number (RCN) 06 zugeordnet. Dies bedeutet, dass das Ablegkriterium AR1 der sichtbaren



Drahtbrüche bei sechs Drahtbrüchen auf einer Länge von  $6 \cdot d$  bzw. bei 13 Drahtbrüchen auf einer Länge von  $30 \cdot d$  erfüllt ist. Das Ablegekriterium AR2 ist definiert als Verdopplung der Anzahl der zulässigen Drahtbrüche von AR1 auf entsprechender Länge. Auf Grund der Gestaltung des Seilprüfstandes sind hierfür jeweils drei Ergebnisse der drei unabhängigen Biegezone vorhanden. Zudem wurde die erreichte Lebensdauer beim Eintreten des Versagenskriteriums sowie die dazugehörige Bruchbiegezone dokumentiert.

Im Rahmen der Seilinspektion der kunststoffummantelten Seilvarianten wurde eine zerstörungsfreie magnetinduktive Seilprüfung durchgeführt. Die Prüfung erfolgte am Seilabschnitt der Biegezone 3, da dieser durch die konstruktive Gestaltung des Prüfstandes am besten mit dem Prüfgerät zu erreichen war. Abbildung 6 zeigt das aufgenommene Messsignal auf einer Länge von ca. 1 m für den Versuch V18 mit Seilvariante 2. Die Ausschläge der Messsignale wurden mit zunehmender Biegezahl größer. Deutliche Ausschläge verweisen auf Drahtbrüche an der Außenseite des Drahtseiles. Auf Grund der Kalibrierung des Ausgangsseiles wurden die sichtbaren Bereiche der Außenlitzen leicht verdichtet. In diesem Bereich entstanden die zu detektierenden und bezüglich der Ablegekriterien entscheidenden Drahtbrüche. Auf Grund der Kalibrierung entstand nur eine geringe Lücke zwischen den Bruchenden eines Einzeldrahtes. Die bereits sehr feine Abtastrate des magnetinduktiven Prüfgerätes konnte nicht jeden einzelnen Drahtbruch detektieren. Zudem entstand durch den Abstand infolge der Kunststoffummantelung eine Minderung der Signalgüte. Die detektierten Störstellen waren meist Häufungen von Drahtbrüchen (Drahtbruchnester).

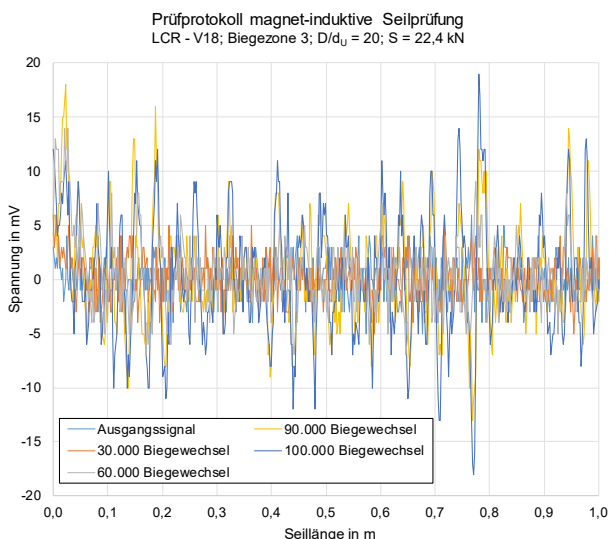


Abbildung 6: Messdaten der magnetinduktiven Seilprüfung

Abbildung 7 zeigt die entsprechende Dokumentation der lokalisierten Störstellen am Seilabschnitt. Geringfügig beeinflusste auch die Seilinnenschädigung das Messsig-

nal. Eine quantitative Aussage des Schädigungsgrades des ummantelten Seiles war anhand dieser Detektiermethode nicht möglich. Eine qualitative Aussage ließ dennoch einen Vergleich mit konventionellen Seilen zu. Durch zusätzliche Untersuchungen wird dieser Vergleich später behandelt.

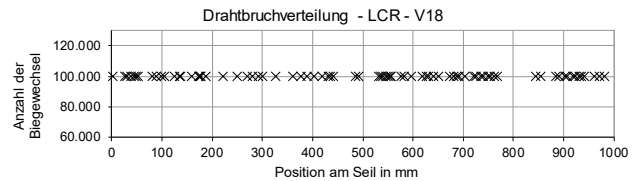


Abbildung 7: Drahtbruchverteilung Versuch V18

Die Kunststoffummantelungen waren während des Versuches starken Belastungen ausgesetzt. Neben der Biegebelastung beim Lauf über Seilscheiben, wobei der Kunststoff lokal einer Zug- bzw. Druckbeanspruchung ausgesetzt war, wurde das konventionelle Innenseil in den Kunststoff in Richtung der Seilscheibe gedrückt. Abbildung 8 zeigt die Dokumentation der Abnutzung der Kunststoffummantelung bei gleichen  $D/d$ -Verhältnis sowie gleicher Laststufe. Im Verlauf des Dauerbiegeversuches entstanden Risse senkrecht zur Seillängsachse. Die Ummantelung der Seilvariante 1 (Kunststoff transparent) riss nur in den Kontaktbereichen zwischen Seil und Seilscheibe. In diesem Berührungsbereich nutzte sich der Kunststoff ab, bis es zu einem Stahl/Stahl-Kontakt zwischen ursprünglich ummantelten Seil und Scheibe kam. Die Seilvariante 2 (Kunststoff schwarz) bildete Risse ebenfalls senkrecht zur Seillängsachse. Diese Risse zogen sich um den gesamten Umfang des Seiles und bildeten so Kunststoffsegmente, die teilweise auf dem Drahtseil verschiebbar waren. Mit zunehmender Versuchsdauer nutzte sich auch diese Kunststoffvariante ab und die Ummantlungssegmente lösten sich vollständig vom Drahtseil. Allgemein war festzustellen, dass der Kunststoff der Seilvariante 1 länger resistent gegen die Belastungen aus dem Dauerbiegeversuch war.

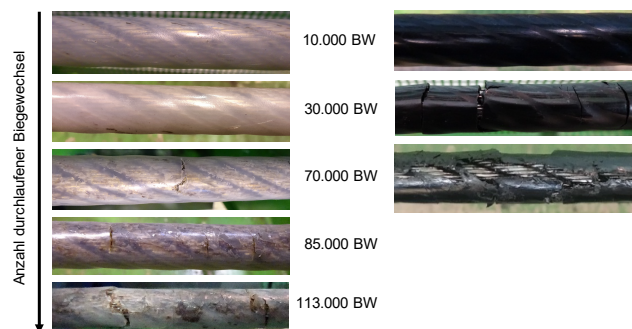


Abbildung 8: Vergleich des Zustandes der Kunststoffummantelung ( $D/d_U = 16$ ;  $S = 15$  kN)

Abbildung 9 zeigt die Ergebnisse der Lebensdaueruntersuchungen aller Seilvarianten bei dem kleinsten  $D/d$ -Verhältnis und der niedrigen Laststufe. Dabei war die Le-

bensdauer des konventionellen Seiles auf der zu großen Rillengeometrie geringfügig kleiner als in der normgerechten Rillengeometrie. Die ummantelten Seilvarianten wiesen einen Lebensdauerzugewinn von +27 % bzw. +53 % verglichen mit der konventionellen Seilvariante 3 auf. Diese Tendenz ließ sich auch für das mittlere D/d-Verhältnis sowie das große D/d-Verhältnis bei dieser Laststufe abzeichnen. Für alle Prüfparameter war die Erhöhung der Lebensdauer infolge der Ummantelung signifikant.

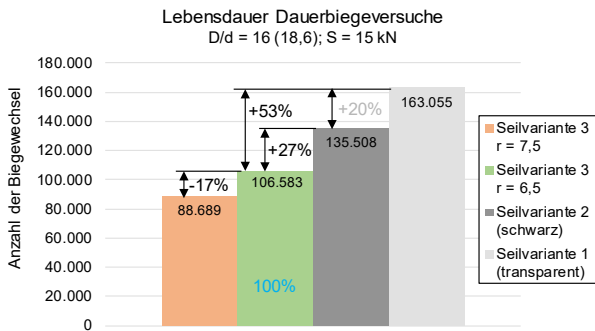


Abbildung 9: Ergebnisse Lebensdauer  
 $D/d_U = 16; S = 15 \text{ kN}$

Abbildung 10 zeigt die Ergebnisse der Lebensdaueruntersuchungen aller Seilvarianten bei dem kleinsten D/d-Verhältnis und der hohen Laststufe. Auch hier war die Lebensdauer des konventionellen Seiles auf der zu großen Rillengeometrie geringfügig reduziert verglichen mit der normgerechten Gestaltung. Die ummantelten Seilvarianten wiesen eine Lebensdauerzugewinn von +55 % bzw. +86 % verglichen mit der konventionellen Seilvariante 3 auf. Auch das mittlere D/d-Verhältnis sowie das große D/d-Verhältnis zeigen diesen Verlauf.

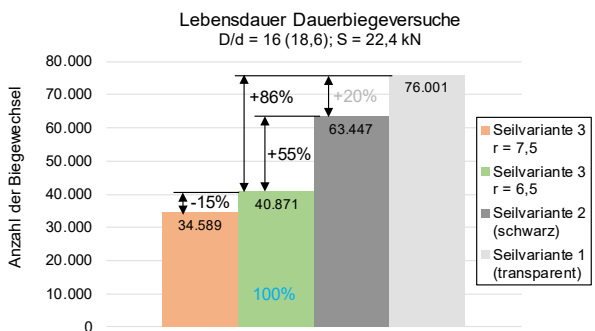


Abbildung 10: Ergebnisse Lebensdauer  
 $D/d_U = 16; S = 22,4 \text{ kN}$

Die genaue Lokalisierung und Dokumentation der Drahtbruchentwicklung während des Dauerbiegeversuches war nur für die konventionelle Seilvariante 3 exakt durchzuführen. Somit konnte auch die Ablegereife genau bestimmt werden. Die geltenden Ablegkriterien konnten für die Seilvarianten 1 und 2 nach Ablösung der Kunststoffummantelung überprüft werden. Die bis zu die-

sem Zeitpunkt auftretenden Drahtbrüche konnten dann exakt lokalisiert werden.

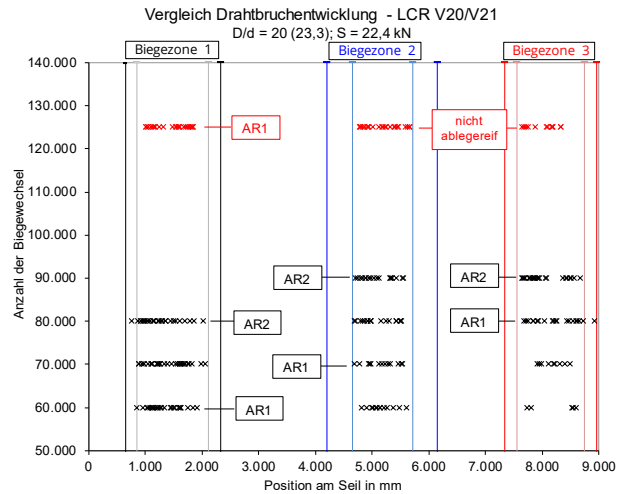


Abbildung 11: Vergleich Drahtbruchentwicklung bei Seilvariante 2 und 3

Abbildung 11 zeigt die Drahtbruchentwicklung des Versuchs V21 des konventionellen Seiles beim großen D/d-Verhältnis und der hohen Laststufe. Die auftretenden Drahtbrüche in den drei Biegezonen sind mit schwarzen Kreuzen dargestellt. Die Anzahl der durchlaufenden Biegewechsel beim Erreichen der AR1 bzw. AR2 sind im Diagramm markiert. Der Dauerbiegeversuch V20 wurde bei gleichen Parametern mit der Seilvariante 2 durchgeführt. Nach 125.000 Biegewechseln war die Kunststoffummantelung in den drei Biegezonen vollständig vom Drahtseil gelöst. Zu diesem Zeitpunkt wurde eine Überprüfung der Seilschädigung mit Fokus auf die sichtbaren äußeren Drahtbrüche durchgeführt. Die detektierten Drahtbrüche sind im Diagramm durch rote Kreuze dargestellt. Lediglich die Biegezone 1 hatte die AR1 auf Grund der Überschreitung der maximal zulässigen Anzahl an Drahtbrüchen erreicht. Die anderen beiden Biegezonen lagen noch unter dem Grenzwert. Ab diesem Zeitpunkt waren die Einzeldrähte dem direkten Stahl/Stahl-Kontakt zwischen Seil und Seilscheibe ausgesetzt. Es wird angenommen, dass das kunststoffummantelte Seil im Inneren deutlich mehr geschädigt ist. Diese nicht sichtbaren Drahtbrüche waren im Rahmen der optischen Seilinspektion nicht erkennbar. Auch die magnetinduktive Seilprüfung konnte diese Schädigung nicht exakt dokumentieren.

### 3.3 ERGEBNISSE NACHUNTERSUCHUNGEN

Im Rahmen der Betrachtungen wurden die getesteten Versuchsseile nach dem Versuchsende einer genauen Nachuntersuchung unterzogen. Dabei wurde der äußere Zustand des Drahtseiles betrachtet. Zusätzlich erfolgte die Begutachtung der inneren Seilschädigung durch die Öffnung des Seiles und die Entnahme der Außenlitzen.

Als Untersuchungskriterium galten die detektierbaren Drahtbrüche an den Außenlitzen der Versuchsseile. Auf Grund der Kalibrierung des Seiles vor dem Ummantlungsprozess wurde die Außenseite der Außenlitzenlage bereits abgeplattet. Diese Abplattung ist in Abbildung 12a deutlich zu erkennen. Eine plastische Verformung der Drahtkuppen der einzelnen Litzendrähne infolge der Druckbelastung an der Seilscheibe war weder für die ummantelten Seilvarianten noch für die konventionelle Variante erkennbar. Zusätzlich sind zwei äußere sichtbare Drahtbrüche zu sehen. Abbildung 12b zeigt einen inneren nicht sichtbaren Drahtbruch aus dem Kontaktbereich der Außenlitzenlage mit dem Seilkern. Weiterhin sind Druckstellen links und rechts der inneren Berührungsbereichs zu erkennen. Diese Abdrücke entstanden durch die Kalibrierung des Seiles. Durch die Durchmesserreduktion wurde die Sperrung der Außenlitzen überwunden. Die Folge ist die Berührung benachbarter Außenlitzen. Dieser Kontakt sollte auf Grund möglicher zusätzlicher Schädigung vermieden werden. Abbildung 12c zeigt Drahtbrüche im Kontaktbereich der benachbarten Außenlitzen. Diese Störstellen wurden als innere nicht sichtbare Drahtbrüche eingestuft.

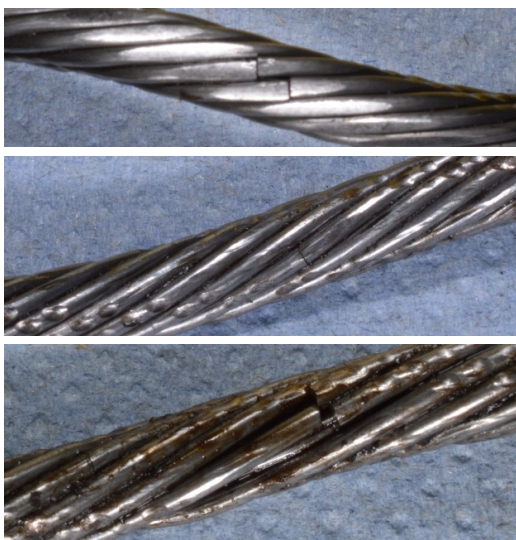


Abbildung 12. Drahtbrüche an den Außenlitzen der Prüfseile a) äußere sichtbare Drahtbrüche  
 b) innere nicht sichtbare Drahtbrüche  
 c) nicht sichtbare Drahtbrüche in den Litzengassen

Auf Grund der prozentualen Auswertung des Anteiles der sichtbaren Drahtbrüche war die Länge des untersuchten Probestückes nicht relevant. Dennoch wurde die gleiche Probenlänge von ca. 0,5 m bei jeder Untersuchung genutzt. Der Gesamtanteil der sichtbaren Drahtbrüche wurde als Mittelwert der Anteile der sechs Außenlitzen gebildet. Beide Seilvarianten mit Kunststoffhülle verzeichneten die Abnahme des Anteils der sichtbaren Drahtbrüche bei steigendem D/d-Verhältnis. Mit steigender Last nahm der Anteil der sichtbaren Drahtbrüche

tendenziell zu. Die Innenschädigung war zumeist immer noch dominant. Die Tendenz des abnehmenden Anteils der sichtbaren Drahtbrüche bei steigendem D/d-Verhältnis, wie bei den beiden kunststoffummantelten Seilvarianten, war bei den konventionellen Drahtseilen nicht erkennbar. Auch die dominierende Innenschädigung war bei beiden Laststufen nicht feststellbar. Deutliche Unterschiede zwischen konventionellem Drahtseil und kunststoffummanteltem Drahtseil waren zu erkennen. Die verwendete Rillengeometrie schien zumindest bei der geringen Änderung keinen Einfluss auf das Schädigungsverhalten des konventionellen Drahtseiles zu haben.

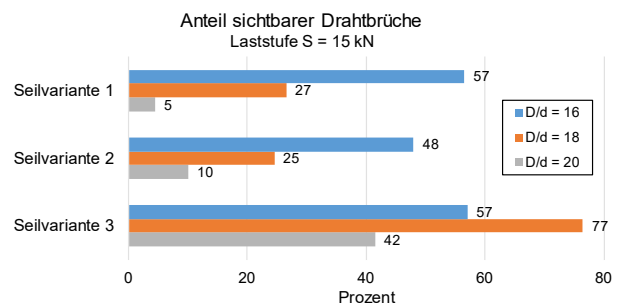


Abbildung 13: Prozentualer Anteil sichtbarer Drahtbrüche; Laststufe S = 15 kN

Der prozentuale Anteil der sichtbaren Drahtbrüche für die drei Seilvarianten bei allen D/d-Verhältnissen und der niedrigen Laststufe ist in Abbildung 13 visualisiert worden. Die Ergebnisse der Nachuntersuchung der Versuchsseile mit hoher Laststufe sind in Abbildung 14 dargestellt. Der qualitative Verlauf des Schädigungsverhaltens war bei den kunststoffummantelten Seilvarianten gleich. Eine quantitative Auswertung hätte jedoch nur mit deutlich mehr Untersuchungen von variantenreich eingesetzten Seilen durchgeführt werden können.

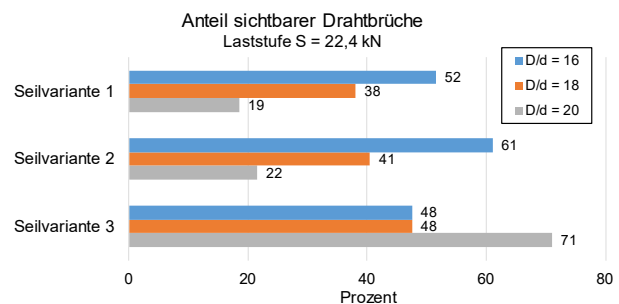


Abbildung 14: Prozentualer Anteil sichtbarer Drahtbrüche; Laststufe S = 22,4 kN

Es wurde angenommen, dass die Innenschädigung bei kunststoffummantelten Drahtseilen überwiegt. Bei gewissen D/d-Verhältnissen trat diese Erscheinung auch auf. Es wurde festgestellt, dass trotz schützender Kunststoffummantelung auch eine deutliche Anzahl Ermüdungsbrüche an der Außenseite der Außenlitzen auftraten.

#### 4 FEM-UNTERSUCHUNGEN

Die Bestimmung der Druckbeanspruchungen an den Seildrähten bei Biegung über eine Seilscheibe ist experimentell nicht möglich. Als Hilfsmittel kann die Finite-Elemente-Methode (FEM) genutzt werden. Die Zug- und Biegebelastung konventioneller und kunststoffummantelter Drahtseile ist gleich stark. Die durch die Seilscheibe hervorgerufene Druckbelastung muss sich auf Grund theoretischer Überlegungen ändern. Um die Verteilung der Druckspannung in einem konventionellen Drahtseil mit der Verteilung in einem kunststoffummantelten Drahtseil zu vergleichen, wurde ein zweidimensionales FE-Modell erzeugt, welches den Querschnitt des entsprechenden Seiles abbildet. Dieses Modell konnte mit relativ geringem Zeitaufwand simuliert werden. Zusätzlich erfolgte die Generierung eines dreidimensionalen Modells, dessen Simulation sehr große Anforderung an Rechenleistung und -zeit stellte.

##### 4.1 FEM-MODELLE

Um die Beanspruchungen der Bauteile hinreichend genau berechnen zu können, war die Festlegung der Materialkennwerte für die verwendeten Werkstoffe notwendig. Dem Drahtstahl wurden der Elastizitätsmodul, eine Querkontraktionszahl sowie ein Schubmodul zugewiesen. Damit wurde ein elastisches, isotropes Materialverhalten vollständig definiert. Das allgemein bekannte Spannungs-Dehnungs-Diagramm eines Stahles ist gekennzeichnet durch den Übergang des elastischen Materialverhaltens in den Bereich der plastischen Verformungen. Die charakteristischen Kenngrößen Zugfestigkeit und Streckgrenze wurden in das FE-Modell impliziert. Mittels Definition einer Datentabelle für Materialeigenschaften konnte ein elastisch-plastisches Materialverhalten erzeugt werden.

Zur Erstellung der Querschnittsabbildung des Litzenseiles waren die geometrischen Abmessungen der Drähte sowie ihre vorkommende Anzahl pro Drahtlage nötig. Des Weiteren stellte die Anzahl der Litzen pro Litzenlage einen zusätzlich zu definierenden Parameter. Zusätzlich wurden zur Geometrieerstellung die Wickelradien der Parallelschlaglitzen benötigt, um die Ausrichtung der einzelnen Drähte innerhalb der Litze wirklichkeitsgetreu darstellen zu können. Abbildung 15 zeigt die Wickelradien einer Warrington-Seale-Litze [Jen92].

Die Einzeldrähte wurden als Kreisquerschnitte definiert. Die Betrachtung des realen Seilquerschnitts weist jedoch meist eine elliptische Querschnittsfläche der einzelnen Drähte auf. Auf Grund der einfachen bzw. doppelten Verseilung stellte die Abbildung einer kreisförmigen Fläche eine starke Abstraktion der Wirklichkeit dar. Für die nachfolgende qualitative Untersuchung der Verteilung der Druckspannung in einem zweidimensionalen Modell ermöglichte die Vereinfachung einen erleichterten Geometrieaufbau. Die Diskretisierung der Drahtfläche

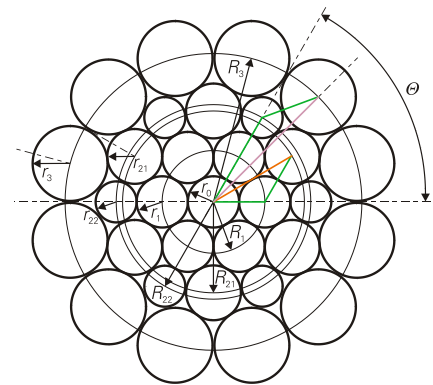


Abbildung 15: Wickelradien Warrington-Seale-Litze

erfolgte mit Elementen des Typs PLANE183. In der späteren Ergebnisbetrachtung wurden speziell die Kontaktstellen der Drähte innerhalb einer Litze sowie die Berührungspunkte der Litzenlagen ausgewertet. Um eine wirklichkeitsgetreue Berechnung der Betrachtungszonen zu erhalten war eine lokale Netzverfeinerung unabdingbar. In die Geometrieerstellung der Seildrähte wurde eine zweistufige Netzverfeinerung integriert.

Nach der Erstellung der kreisförmigen Drahtquerschnitte des Litzenseiles erfolgte die Generierung der Kunststoffummantelung. Die Grundstruktur der Ummantelung wurde durch einen Kreisring abgebildet, dessen innerer Durchmesser durch den Teilkreisdurchmesser der Außenlitzenlage im Gesamtseil dargestellt werden konnte. Die Struktur der umhüllten Parallelschlaglitzen wurde entsprechend nachgebildet (Abbildung 16).

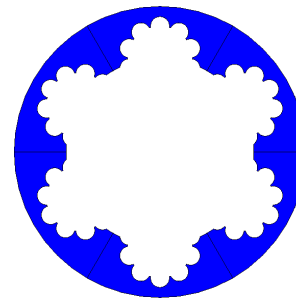


Abbildung 16: Kunststoffummantelung im FE-Modell

Die Erstellung der Scheibengeometrie erfolgte für den Rillradius in Abhängigkeit des Seildurchmessers. Je nach Untersuchungsmodell wurde also der Durchmesser des Drahtseiles bzw. der Kunststoffummantelung zur Festlegung des Scheibenparameters genutzt. Die Seilscheibengeometrie wurde durch die Generierung einer halben Kreisringfläche erzeugt.

Für die Erstellung der Kontakte zwischen den Drähten innerhalb einer Litze, zwischen den Litzenlagen sowie den Kontakten zwischen Seil und Kunststoffummantelung sowie Kunststoff und Seilscheibe wurden zweidimensionale Elemente eingesetzt. Eine Kontaktpaarung besteht



aus Contact- und Target-Elementen, die miteinander interagieren. Die Kontaktelemente wurden auf eine bestehende Vernetzung aufgelegt. Die Vernetzung der Contact-Bereiche einer Kontaktpaarung wurde durch CONTA172-Elemente realisiert. Um die Kontaktpaarung vollständig zu definieren, wurden die Target-Bereiche mit dem Element TARGE169 vernetzt. Betrachtet man den modellierten Querschnitt einer Parallelschlaglitze, so ergeben sich zwei unterschiedliche Kontaktzonen. Die Lagendrähte übereinanderliegender Lagen befinden sich im geschlossenen Kontakt zueinander. Der Kontaktbereich zwischen den Drähten einer Lage gilt allgemein als offen. Auf Grund der Belastung des Drahtseiles können die Drähte einer Lage aber in Kontakt geraten. Diese Betrachtung erforderte die Definition von Kontaktpaarungen in jedem Bereich (Abbildung 17). Basierend auf den unterschiedlichen Grundvoraussetzungen wurden veränderte Einstellungen für die unterschiedlichen Kontakte festgelegt. In dem Untersuchungsmodell eines kunststoffummantelten Litzenseiles musste der Kontakt der Außendrähte der Außenlitzenzlage mit der Hülle definiert werden. Diese Kontaktpaarung der zwei unterschiedlichen Materialien wurde als geschlossener Kontakt festgelegt. Diesem geschlossenen Kontakt wurde die Möglichkeit des Gleitens zugeschrieben. Die Kontaktpaarung zwischen der Seilscheibenrinne sowie dem Gesamtseil musste je nach Untersuchungsmodell als Draht/Scheibe-Kontakt bzw. Kunststoff/Scheibe-Kontakt definiert werden.

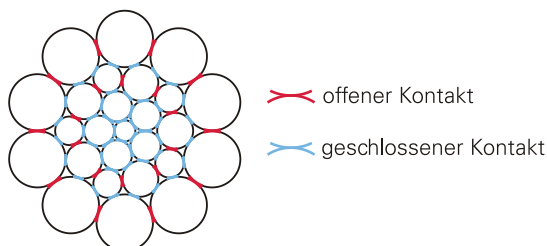


Abbildung 17: Bereiche der Kontaktdefinition der Drähte einer 26WS-Litze

Nachfolgend wird der Aufbau des dreidimensionalen Geometriemodells beschrieben. Die mathematische Beschreibung der Raumkurven der einfachen und zweifachen Verseilung kann der Fachliteratur [Fey00] entnommen werden. Während der Erstellung des dreidimensionalen Modells eines Litzenseiles wurden die Einzeldrähte in Segmente unterteilt, deren interne Bezugskoordinatensysteme entsprechend der nachfolgenden Diskretisierung angepasst wurden (Abbildung 18). Der Bezug wurde genutzt, um die Ausrichtung der Kontaktdefinition an die Struktur des Litzenseiles zu gewährleisten.

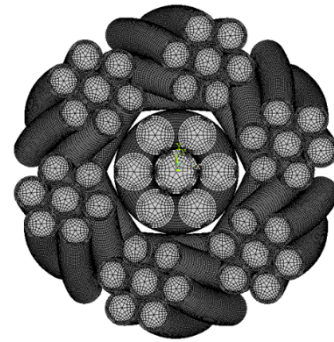


Abbildung 18: Vollständig diskretisiertes Drahtseilmodell mit strukturiertem Gitter

Ein Vorteil der Vernetzung eines strukturierten Gitters mit Hexaederelementen ist die geringere Anforderung an Speicher- und Rechenleistung verglichen mit einem unstrukturierten Gitter. Dennoch war der allgemeine Anspruch an die Rechenleistung bei der Simulation eines Litzenseiles enorm hoch. Die Einbeziehung der Parallelschlaglitzen der Außenlage überstieg die zur Verfügung stehende Rechenleistung bei weitem.

Die Form des Querschnitts der Ummantelung ändert sich entlang des Litzenseiles im dreidimensionalen Raum ständig. Die Vorgehensweise der Erstellung durch Austragen der Stirnfläche, wie beim zweidimensionalen Modell, funktionierte hierbei nicht mehr. Es wurde eine Boolesche Operation, die sich direkt auf das Volumen der Drahtmodelle stützt, verwendet. Dazu wurden Modelle erstellt, die das Drahtvolumen aus der schlauchförmigen Ummantelung herauszuschneiden. Im Anschluss wurden diese Drahtmodelle wieder gelöscht. Das erstellte Teilssegment der Kunststoffummantelung konnte zur vollständigen Umhüllung des Litzendrahtseiles gemustert werden (Abbildung 19).

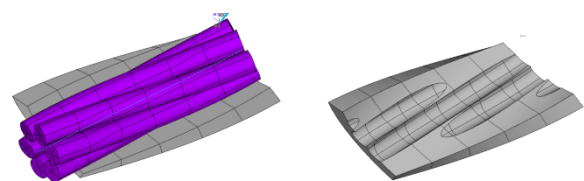


Abbildung 19: Modellierung der Ummantelung für Litzenseil;  
 a) Ummantelung mit Drahtmodell;  
 b) Ummantelung mit herausgeschnittenen Drahtvolumen

Hinsichtlich der Art des Kontaktes kann ein Surface-to-Surface-Kontakt punktförmig oder linienförmig auftreten. Das untersuchte Rundlitzenseil wies beide Formen auf. Abbildung 20 zeigt die definierten Kontaktbereiche im Seilmodell exemplarisch an der kunststoffummantelten Variante. Im Untersuchungsfall des konventionellen Drahtseiles wurde der Kontakt zwischen Außendraht und Seilscheibe als geschlossener Punktkontakt definiert.

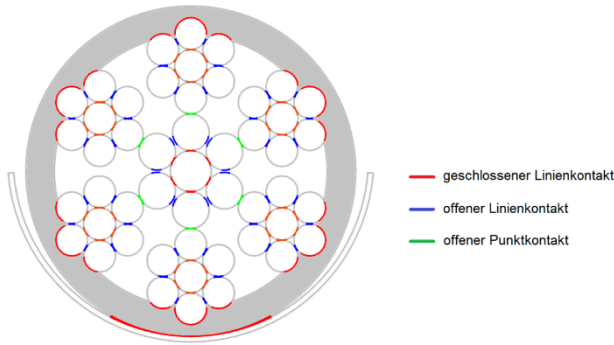


Abbildung 20: Bereiche der Kontaktdefinition im Rundlitzenseil

Im Rahmen der Modellierung konnten zwei- und dreidimensionale Geometriemodelle konventioneller und kunststoffummantelter Drahtseile generiert werden. Die komplexe Konstruktionsstruktur der Seilgeometrie und die zahlreichen Kontaktpaarungen zwischen Einzeldrähten, Litzenverbänden und dem Gesamtseil mit der Seilscheibe erwiesen sich bei der Modellierung als höchst anspruchsvoll. Die Kalibrierung des Seiles zur experimentellen Untersuchung konnte im FE-Modell nicht nachgebildet werden, da Drahtverformungen und Eigenspannungen unbekannt sind.

#### 4.2 FE-MODELL BEANSPRUCHUNG

Das Litzenseil wird bei dem Lauf über eine Seilscheibe mehreren Belastungen ausgesetzt. Die Seilzugkraft erzeugt eine Schnürwirkung der Drähte innerhalb einer Litze sowie eine Schnürung der Litzenlagen um die Kernlitze. Des Weiteren belastet eine, aus der Biegung über die Scheibe resultierende, Streckenlast die Seildrähte. In dem Untersuchungsmodell wurden die Schnürdrücke der Draht- und Litzenlagen sowie die Streckenlast als Randbedingungen auf die Einzeldrähte bzw. die Seilscheibe aufgegeben. Neben der Kraftereinleitung wurden zusätzlich Lagerungen definiert, um die Bewegungsrichtung der Drähte einzuschränken. Durch die Betrachtung eines zweidimensionalen Untersuchungsmodells mussten die Freiheitsgrade eindeutig definiert werden, da die Schnürung der Drähte entlang der Seillängsachse nicht simuliert werden konnte.

Die weitere Betrachtung unterliegt der Voraussetzung, dass das Aufdrehen der Litzen und Seile verhindert werden würde. Die schraubenförmig geschlagenen Lagendrähte einer Litze stützen sich unter Zugbelastung auf den Kerndraht oder die unterliegende Drahtlage. Dadurch wird ein Schnürdruck erzeugt, welcher als längenbezogene Radialkraft anzusehen ist. Abbildung 21 zeigt die Wirkungsrichtung des Schnürdrucks durch die Belastung des Seiles mit der Seilzugkraft. Dabei kommt es in einem Litzenseil zur Schnürung der Drähte um den Litzenkern sowie zur Schnürung der Litzenlagen um die Seileinlage. Dieser Effekt bedingt eine geringe Verlängerung des Seiles sowie die Reduktion des Drahtnennendurchmessers.

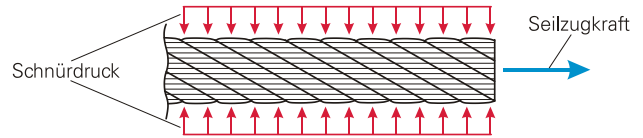


Abbildung 21: Wirkung des Schnürdrucks auf ein Seil

Die Generierung der Randbedingungen wurde in zwei Schritten durchgeführt. Zunächst erfolgte die Selektion, Ausrichtung und Komponentenbildung für die Randbedingungen des Draht- bzw. Litzenschnürdrucks. Die zur Kraftereinleitung des Drahtschnürdrucks ausgewählten Knoten wurden einer Ausrichtung ihres internen Koordinatensystems zum jeweiligen Litzenmittelpunkt unterzogen. Weiterhin wurden die Knoten zur Kraftereinleitung des Litzenschnürdrucks in Richtung des globalen Koordinatensystems im Seilmittelpunkt ausgerichtet. Zusätzlich wurden Loslagerungen für alle Drahtquerschnitte vorbereitet. Im zweiten Teil wurden die Kräfte auf die vorgesehenen Knoten aufgebracht. Des Weiteren wurden die Knoten-Komponenten der Lagendrähte als Loslagerung definiert. Somit war die Bewegung der Lagendrähte nur in Richtung des jeweiligen Litzenmittelpunktes möglich. Die Kerndrähte einer jeden Litzenlage wurden ebenfalls mit einer Loslagerung versehen. Diese gestattete ausschließlich die Bewegung in Richtung Seilmittelpunkt. Der Mittelpunkt des Kerndrahtes der Kernlitze wurde fest eingespannt. Abbildung 22 zeigt die Gesamtheit der Kraftereinleitungs- und Lagerungsbedingungen der Drähte des Litzenseiles.

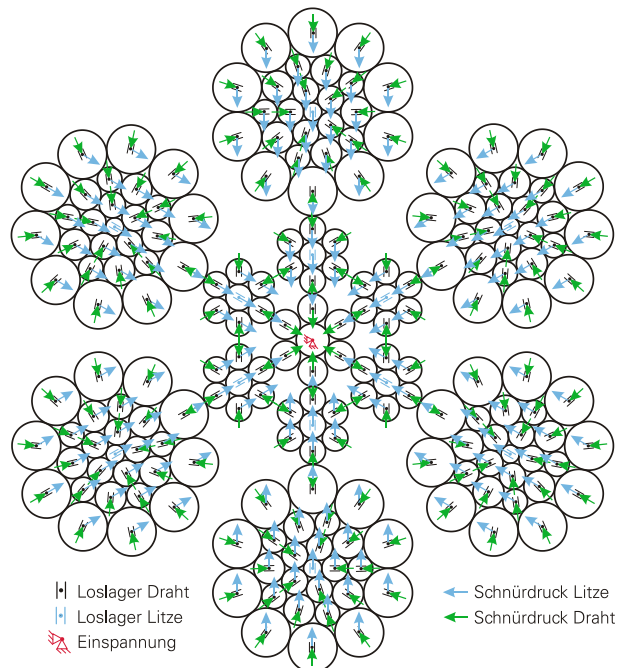


Abbildung 22: Randbedingungen der Seildrähte



Die Streckenlast wurde durch das Drücken der Scheibe in Richtung des Seilmittelpunktes auf das Seil aufgebracht. Dabei erfolgte die Krafteinleitung über einen externen Punkt der mittels einer starren Constraint Equation mit den Knoten der Scheibe verbunden wurde und die Kraft gleichmäßig verteilte (Abbildung 23). Der Krafteinleitungsknoten wurde mit einem MASS21-Element vernetzt, welches als Punktelement deklariert wurde.

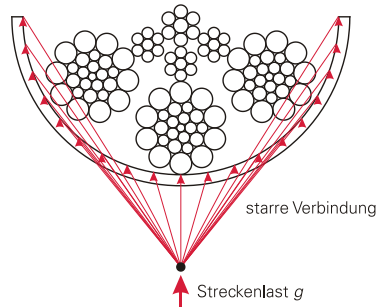


Abbildung 23: Krafteinleitung der Streckenlast in die Scheibe

Nachfolgend wird die Aufbringung und Definition der Randbedingungen im dreidimensionalen Geometriemodell beschrieben. Zur Fixierung des Seiles wurde ein Seilende mittels Knotenfixierung fest eingespannt. Alle Freiheitsgrade der Knoten an diesem Seilende wurden beschränkt, um die translatorischen und rotatorischen Bewegungen zu unterbinden. Auf der Zugseite am zweiten Seilende erfolgte die Zugkrafteinleitung über einen masselosen Pilot-Knoten, der in Verlängerung der Seillängsachse definiert wurde. Die Bewegungseigenschaften des Pilot-Knoten wurden mit allen Knoten der Kontaktflächen am Seilende verknüpft. Durch die Einschränkung der Freiheitsgrade der Rotationsbewegung war nur noch die translatorische Bewegung entlang der Seillängsachse möglich. Somit wurde eine ideale symmetrische Zuglastverteilung auf die Einzeldrähte erreicht. Die Aufbringung der zugkraftbedingten Randbedingungen ist in Abbildung 24 dargestellt.

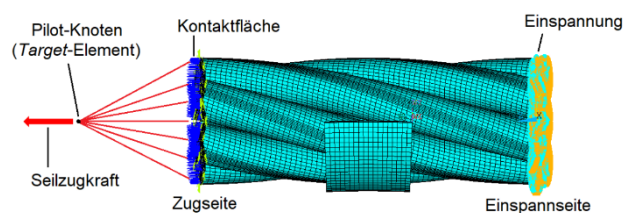


Abbildung 24: Einspannung und Zugkrafteinleitung

Die Einleitung der Querkraft wurde von der Seilscheibe in Richtung des Seilmittelpunktes ausgeübt. Dazu wurde die Verknüpfung eines externen Krafteinleitungsknotens mit den Knoten der Seilscheibe implementiert. Die Streckenlast ließ sich entsprechend der Modellgröße

der Seilscheibe gleichmäßig auf deren Oberfläche verteilen. Durch die Einschränkung von Freiheitsgraden war nur die in Richtung der Seilmittelachse gerichtete Translation zulässig (Abbildung 25).

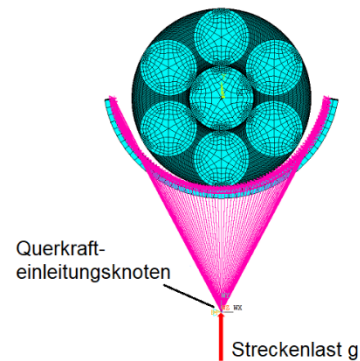


Abbildung 25: Querkrafteinleitung

Auf Grund der aufgetragenen Randbedingungen an den Seilenden wurde das Seilmodell in diesen Bereichen eingeschränkt. Zur Entfaltung des seilspezifischen Verhaltens musste ein ausreichend langes Seilmodell simuliert werden, um den Einfluss der Randbereiche zu eliminieren.

### 4.3 FE-SIMULATION

Im Rahmen der Untersuchungen sind Simulationen mit den erstellten zwei- und dreidimensionalen Geometriemodellen der Seilvarianten durchgeführt worden. Dabei wurden Randbedingungen auf das Seilmodell aufgebracht, die den realen Belastungen durch Zug infolge einer zu hebenden Masse sowie durch Biegung infolge der Umlenkung durch Seilscheiben entsprechen. In der Auswertung wurden die Ort und die Größe der maximal auftretenden Druckspannung der konventionellen und kunststoffummantelten Seilmodelle untersucht.

Während der Untersuchungen wurden zahlreiche FE-Simulation des zweidimensionalen Seilmodells durchgeführt. Dabei wurde die Seilkonstruktion systematisch aufgebaut. Beginnend mit der Simulation eines Modells einer Einfachlitze, über eine Parallelschlaglitze und ein 6x7-Litzenseil bis hin zum vollständigen 6x26WS-Litzenseil wurden die Simulationen mit und ohne Kunststoff durchgeführt. Im Vorfeld dieser Simulationen wurde eine Parameterstudie zur Gestaltung einer optimalen Diskretisierung durchgeführt. Mittels des Untersuchungsmodells zweier aufeinanderliegender Drähte, welche durch eine Druckkraft belastet wurden, konnte die Pressung zwischen den Körpern ermittelt werden. Der Vergleich mit den analytisch bestimmten Werten wurde als Bewertungsstandart zur Validierung der Feinheit der Vernetzung genutzt. Für alle zweidimensionalen Unter-

suchungsmodelle wurden vier Simulationen durchgeführt, um die Unterschiede zwischen einer konventionellen Fertigung und der zusätzlichen Aufbringung einer Kunststoffummantelung auszuwerten:

- konventionell, nur Schnürdruck (SD),
- konventionell, Schnürdruck und Scheibe (SD\_S),
- kunststoffummantelt, nur Schnürdruck (SD\_KS),
- kunststoffummantelt, Schnürdruck und Scheibe (SD\_KS\_S).

Auf die Darstellung der Ergebnisse der Einfachlitze sowie der Parallelschlaglitze wird in diesem Bericht verzichtet. Das Untersuchungsmodell des 6x7-Litzenseiles bildet die Einlage des zu untersuchenden Gesamtmodells. Dabei wurden sechs Einfachlitzen um die Kerneinfachlitze geschlagen. In dieser Untersuchung wurden die Litzen bereits hinsichtlich ihrer Benennung im Gesamtmodell bezeichnet. In der Auswertung wurden die relevanten Schädigungszonen:

- Lagendraht Mittellage – Kerndraht Mittellage (LD – KD)
- Litze Mittellage – Litze Kernlage (ML – KL)
- Lagendraht Mittellage – Scheibe/Kunststoff (LD – S/KS)

betrachtet. Die Ergebnisse der Spannungsmaxima in den Betrachtungszonen aus Tabelle 1 wurden mit der üblichen feinen Vernetzung der Drähte sowie der Kunststoffummantelung ermittelt. In der Auswertung wurden die Änderungen der dritten Hauptspannung  $\Delta\sigma_3$  durch die Belastung des Seiles mit der Scheibe und der aufgetragenen Streckenlast ermittelt. Dabei wurde der Spannungswert der reinen Schnürdrucksimulation von dem Maximalbetrag der Belastungskombination aus Schnürdruck und Streckenlast abgezogen. Diese Betrachtung erfolgte jeweils für das konventionelle sowie das kunststoffummantelte Seil.

Tabelle 1: Auswertung der FE-Simulationen des Untersuchungsmodells 6x7-Litzenseiles

Modell	$\sigma_3$ in MPa		
	ML KD - LD	KL - ML	ML - S/KS
SD	1.677,3	1.199,7	-
SD_S	3.697,5	2.203,5	3.100,6
SD_KS	1.484,0	1.024,1	-
SD_S_KS	2.054,4	1.556,9	171,2

Modell	$\Delta\sigma_3$ in MPa		Reduktion in %		
	ML KD - LD	KL - ML	ML KD - LD	KL - ML	ML - S/KS
SD_S	2.020,2	1.003,8	-	-	-
SD_S_KS	570,4	532,8	-71,8	-46,9	-94,5

Die größte Reduzierung der Druckspannung trat erwartungsgemäß in der Kontaktzone des Drahtes mit der Scheibe/Kunststoffummantelung auf. Weiterhin ließen sich signifikante Minderungen in den weiteren Untersuchungszonen feststellen. In diesem Untersuchungsmodell wurden erstmals beide Betrachtungszonen der Methode

„Leipzig“ abgebildet. Die Reduzierung der Beanspruchungen lieferten erste Erkenntnisse über den positiven Einfluss der Kunststoffummantelung des Drahtseiles auf die zu erwartende Betriebs- und Lebensdauer.

Abbildung 26 visualisiert die Druckspannungsverteilung für die beiden Modellspezifikationen des 6x7 Litzenseiles. Es konnte eine deutliche Entlastung der in Kontakt zur Seilrille befindlichen Litze festgestellt werden. Weiterhin wurde die Spannung auf mehrere Außendrähte der Außenlitzenlage verteilt. Zusätzlich setzte sich die Minderung der Spannung im gesamten Seilquerschnitt fort.

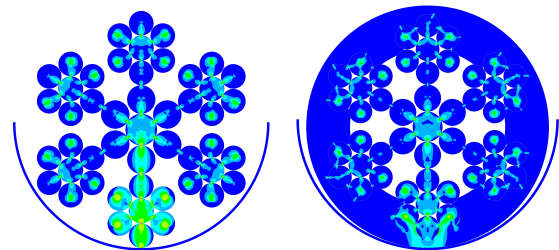


Abbildung 26. Druckspannungsvergleich 6x7-Litzenseil; a) konventionelles 6x7-Litzenseil; b) kunststoffummanteltes 6x7-Litzenseil

Abschließend wurde die Gesamtseilkonstruktion eines Litzenseiles mit sechs Außenlitzen in Warrington-Seale Machart sowie einer unabhängig verseilten Einlage aus sieben Einfachlitzen simuliert. Die betrachteten Schädigungszonen der Methode „Leipzig“ wurden dabei genauer untersucht. Insgesamt erfolgte die Betrachtung für die Bereiche:

- Litze Außenlage – Litze Mittellage (AL – ML),
- 3. Lage – 2. Lage dick (3L – 2L1),
- 3. Lage – 2. Lage dünn (3L – 2L2),
- 3. Lage – Scheibe/Kunststoff (LD – S/KS).

Damit wurden neben der inneren und äußeren Berührungszonen nach Methode „Leipzig“ zusätzlich die Kontaktstellen der Außendrähte der Außenlitze zu der unterliegenden Litzenlage in der Parallelschlaglitze untersucht. Das Untersuchungsmodell des 6x26WS-Litzenseiles enthielt eine vielfache Drahtanzahl im Vergleich zu den bisherigen Simulationsmodellen. Der hohe Diskretisierungsgrad der Drahtquerschnitte sowie der Kunststoffabbildung konnte auf Grund der massiven Steigerung der Elementanzahl nicht genutzt werden. Die durchzuführenden Simulationen waren mit der zur Verfügung stehenden Rechentechnik nicht realisierbar. Die bekannten Modellspezifikationen wurden mit veränderten Netzparametern für den Drahtquerschnitt, die Seilscheibe und für die Kunststoffummantelung durchgeführt.

Tabelle 2: Auswertung der FE-Simulationen des Untersuchungsmodells 6x26WS-Litzenseiles

Modell	$\sigma_3$ in MPa			
	ML - AL	3L - 2L1	3L - 2L2	AL - S/KS
SD	112,5	1.071,3	1.156,3	-
SD_S	97,3	3.034,2	2.971,4	3.232,6
SD_KS	110,5	730,6	786,8	-
SD_S_KS	106,5	1.912,1	2.011,7	186,1

Modell	$\Delta\sigma_3$ in MPa		
	ML - AL	3L - 2L1	3L - 2L2
SD_S	15,2	1.962,9	1.815,1
SD_S_KS	4,0	1.181,5	1.224,9

Modell	Reduktion in %			
	ML - AL	3L - 2L1	3L - 2L2	AL - S/KS
SD_S_KS	-73,7	-39,8	-32,5	-94,2

Tabelle 2 liefert eine Übersicht der numerischen Lösungen für die Spannungen in den schadensrelevanten Betrachtungszonen. Es erfolgte die bekannte Auswertung der Spannungsänderung durch die Wirkung der Streckenlast sowie der prozentuale Vergleich. Die Reduktion der Spannung in der Kontaktstelle des Außendrahtes der Außenlitzen zur Seilscheibe bzw. zur Kunststoffummantelung entsprach dem Reduzierungsgrad an dieser Stelle in den bisherigen Untersuchungsmodellen. Damit lag die höchste Beanspruchung des Seilquerschnittes zwar weiterhin an den Außendrähten der Außenlitze, der Ort der Beanspruchung verschob sich jedoch von der Kontaktzone zur Seilscheibe in Richtung der unterliegenden Drahtlage der Parallelschlaglitze. Auch an diesen Betrachtungszonen ließ sich eine deutliche Reduzierung des Spannungsmaximums feststellen. Weiterhin ließ sich die Tendenz der Untersuchungsmodelle, wonach die Kunststoffummantelung bereits zur Reduzierung der Beanspruchung infolge der reinen Schnürdruckbelastung beiträgt, deutlich erkennen. Die numerisch ermittelten Werte für den Kontaktbereich der Außendrähte der Außenlitzen zu den Außendrähten der Seileinlage wurden durch die Nutzung der Kunststoffummantelung ebenfalls reduziert. Diese Werte erschienen jedoch sehr gering. In den Untersuchungen des Versuchsmodells des 6x7-Litzenseiles, mit höherem Diskretisierungsgrad, wurden deutlich größere Beträge ermittelt. Die auftretende Problematik ließ sich durch nähere Betrachtung der definierten Freiheitsgrade der Einzeldrähte der Parallelschlaglitze beurteilen. In jedem Draht der drei Drahtlagen der untersuchten Litzenstruktur wurde eine Loslagerung bezüglich des Litzenkerndrahtes definiert. Im Gesamtmodell lagen einzelne Drähte der Außenlitze so, dass ihre Loslagerung genau senkrecht zu der Loslagerung des Litzenkerndrahtes stand. Diese antagonistische Stellung verhinderte die Bewegung der Lagendrähte infolge der Belastung durch den Litzenschnürdruck. Auf Grund der Unterbindung der Bewegungsfreiheit der Parallelschlaglitze konnte die aus der FE-Simulation erhaltene Druckspannung zwischen der

Außenlitzenlage und der Seileinlage nicht ausgewertet werden. Ein Erkenntnisgewinn für die Änderung der Druckbeanspruchung bei kunststoffummantelten Seilen gegenüber konventionellen Seilen für die innere Betrachtungszone der Methode „Leipzig“ war mit dem Gesamtmodell 6x26WS-Litzenseiles nicht zu erzielen.

Im Folgenden wird die Auswertung der dreidimensionalen Simulationsmodelle beschrieben. Zur Minimierung der Einflüsse der Randbedingungen an den Seilenden erfolgte die Auswertung um die Modellmittelebene. Der Hauptschwerpunkt der Auswertung war die Spannungsverteilung bzw. die Spannungsmaxima in einem zug- und querbelasteten Litzenseil sowie die Auswirkung einer Kunststoffummantelung. Dazu wurden die numerischen Ergebnisse der Kriterien:

- axiale Beanspruchung (Drahtzugspannung  $\sigma_z$ ),
- dritte Hauptspannung  $\sigma_3$  (Auswertung für die Kontaktpressung),
- Vergleichsspannung  $\sigma_v$  (von-Mises-Spannung)

näher betrachtet. Die Auswertung erfolgte qualitativ und wurde mittels einer grafischen Darstellung ergänzt. Des Weiteren wurde in einem definierten Bereich der Spannungsverlauf entlang einer Pfadlinie implementiert, um exakte Spannungswerte zu erhalten und vergleichen zu können. Mit allen Untersuchungsmodellen wurden vier Simulationen durchgeführt:

- 1: konventionell, nur Zugbelastung,
- 2: konventionell, mit Zug- und Querbelastung,
- 3: kunststoffummantelt, nur Zugbelastung,
- 4: kunststoffummantelt, mit Zug- und Querbelastung.

Die Auswertung des dreidimensionalen Seilmodells erfolgte, wie schon bei der zweidimensionalen Betrachtung, durch strukturierten Aufbau der Seilkonstruktion. Nachfolgend werden die Ergebnisse der FE-Simulation eines 6x7-Litzenseiles vorgestellt. Abbildung 27 zeigt die Verteilung der Spannung bei reiner Zugbelastung. Infolge des Schnürverhaltens zogen sich die Lagendrähte um den Kerndraht der jeweiligen Litzenlage. Weiterhin zog sich die äußere Litzenlage um die Kernlitze. Dieser Effekt wurde in der Darstellung nur bedingt abgebildet. Die definierten Randbedingungen zur Einspannung und Zugkraftaufbringung beeinflussten das Verhalten der Drähte. Das Seilmodell wurde nach den zur Verfügung stehenden Kapazitäten der Rechentechnik maximal lang gestaltet. Es scheint dennoch nicht ausreichend lang gewesen zu sein, um die Einflüsse vollständig zu eliminieren. Durch die spätere Aufbringung der Querkraft wurden diese Einflüsse reduziert.

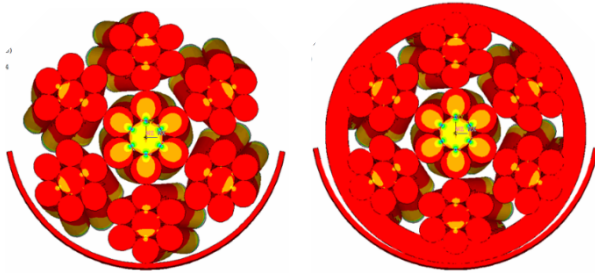


Abbildung 27: Spannungsverteilung im 6x7-Litzenseil infolge von Zugbelastung;  
 a) konventionelle Einfachlitze;  
 b) kunststoffummantelte Einfachlitze

Abbildung 28 zeigt den Verlauf der Spannung durch das Modell des 6x7-Litzenseiles mit und ohne Kunststoffummantelung. Die Kunststoffummantelung einen vernachlässigbaren Einfluss auf die Spannungsverteilung.

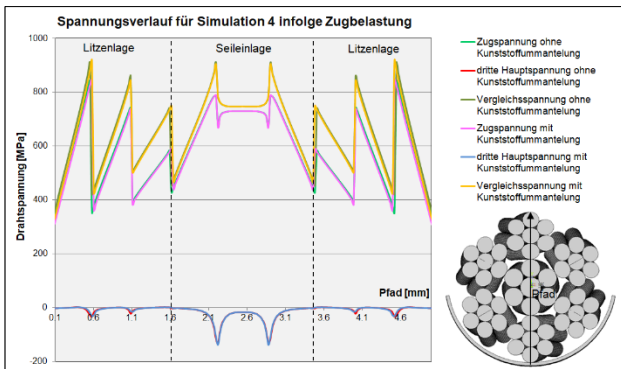


Abbildung 28: Spannungsverlauf durch das Modell des 6x7-Litzenseiles bei Zugbelastung

Nachfolgend wurde die FE-Simulation mit der Aufbringung einer Querkraft durch die Seilscheibe erweitert. Abbildung 29 zeigt die Spannungsverteilung im 6x7-Litzenseil mit und ohne Kunststoffummantelung. Das Maximum der Druckspannung des konventionellen Seilmodells lag im Kontaktbereich der Außendrähte der Außenlitze mit der Seilscheibe.

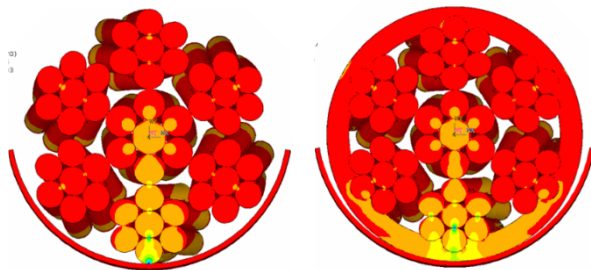


Abbildung 29: Spannungsverteilung im 6x7-Litzenseil infolge von Zug- und Querbeltung;  
 a) konventionelles 6x7-Litzenseil;  
 b) kunststoffummanteltes 6x7-Litzenseil

Die Spannung verringerte sich in Richtung des Seilmittelpunktes. Durch die Kunststoffummantelung wurde die Spannung an der Außenseite des Außendrahtes der Außenlitze deutlich reduziert. Es erfolgte eine breitflächigere Verteilung der Belastung auf den Drahtumfang. Zusätzlich wurden auch die benachbarten Drähte geringfügig belastet. Das Maximum der Druckspannung verschob sich an dem Außendraht der Außenlitze in den Kontaktbereich mit dem Kerndraht der Litzenlage.

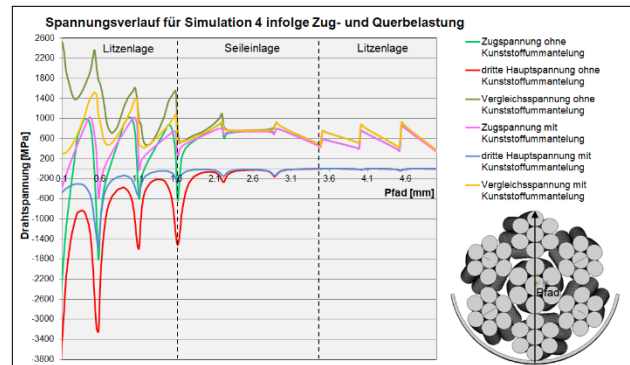


Abbildung 30: Spannungsverlauf durch das Modell des 6x7-Litzenseiles bei Zug- und Querbeltung

Abbildung 30 zeigt den Spannungsverlauf durch das Seilmodell mit und ohne Kunststoffummantelung entlang eines Pfades.

Tabelle 3: Auswertung der FE-Simulationen des 6x7-Litzenseiles

Modell	$\sigma_3$ in MPa		
	ML KD - LD	KL - ML	ML - S/KS
SD	33,8	3,3	-
SD_S	3.247,8	1.520,4	4.626,0
SD_KS	31,7	3,1	-
SD_S_KS	1.568,4	269,1	718,6

Modell	$\Delta\sigma_3$ in MPa		Reduktion in %		
	ML KD - LD	KL - ML	ML KD - LD	KL - ML	ML - S/KS
SD_S	3.214,0	1.517,1	-	-	-
SD_S_KS	1.536,7	266,0	-52,2	-82,5	-84,5

Die Zusammenfassung der Ergebnisse der FE-Simulation des dreidimensionalen Modells des 6x7-Litzenseiles ist in Tabelle 3 dargestellt. Dabei wurden die Spannungen in den entsprechenden Kontaktbereichen miteinander verglichen und die prozentuale Reduzierung des maximalen Spannungswertes ermittelt.

Im Rahmen der Untersuchungen konnten die erstellten zwei- und dreidimensionalen FE-Modelle mit und ohne Kunststoffummantelung simuliert werden. Durch die Belastung mittels Zug- und Querkraft konnte der Lauf des Seiles über eine Seilscheibe abgebildet werden. Auf Grund der enormen Anforderung an die Rechenleistung konnte das dreidimensionale Modell nur bis zum 6x7-Litzenseil untersucht werden. Die erreichten Ergebnisse wurden dennoch als positiv bewertet, da sie die theoretischen Annahmen validieren.

## 5 LEBENSDAUERABSCHÄTZUNG

Die Methode „Leipzig“ bietet die Möglichkeit, die zu erwartende Betriebs- bzw. Lebensdauer eines Drahtseiles abzuschätzen. Dabei wird die Betrachtung in der Ermittlung einer Biegewechselzahl für den inneren und äußeren Schädigungsbereich der Außendrähte einer Außenlitze unterteilt. Mittels der Erkenntnisse aus experimentellen und numerischen Untersuchungen sollte der Abschätzungsansatz der Methode „Leipzig“ um den Gegenstand der kunststoffummantelten Drahtseile erweitert werden. Drahtseile sind hinsichtlich ihrer Konstruktion außerordentlich vielfältig. Je nach Anwendungsfall werden Seilkonstruktionen eingesetzt, deren Eigenschaften den komplexen Anforderungen des jeweiligen Einsatzgebietes am besten entsprechen. Daher konnte der Abschätzungsansatz der Methode „Leipzig“ im Rahmen der Untersuchungen nur für die verwendete Konstruktionsform angepasst werden.

Die Lebensdauer der experimentell untersuchten Konstruktionsform wurde rechnerisch mittels der Methode „Leipzig“ abgeschätzt. Auf Grundlage der gewonnenen Erkenntnisse der Beanspruchung der Einzeldrähte bei Zug- und Querbelastung in den numerischen Simulationen konnte die prozentuale Reduktion der Beanspruchung sowie die Verlagerung des Ortes der maximalen Spannungsinduzierung bestimmt werden. Mit diesen Ergebnissen konnte der Anteil der Druckspannung an der Schädigung des Drahtseiles während des Laufs über Seilscheiben im Berechnungsansatz angepasst werden.

Es wurde festgestellt, dass die Auswertung der Ergebnisse der zweidimensionalen FE-Simulation des 6x26WS-Litzenseiles für den äußeren Kontaktbereich der Außendrähte zu der Seilscheibe bzw. der Kunststoffummantelung zulässig ist. Daher wurde die innere Schädigungszone in der nachfolgenden Betrachtung nicht ausführlicher untersucht. Im FE-Modell des Gesamtseiles konnte eine sehr hohe Reduktion der Druckspannung an der Außenseite der Außendrähte der Parallelschlaglitzlage festgestellt werden. Aufgrund der starken Minderung der maximalen Spannung in diesem Kontaktbereich verschob sich der Ort der maximalen Spannung bei Kunststoffummantelung von der in Kontakt zur Scheibe befindlichen Außenseite der Drähte in den Kontaktbereich des Außendrahtes zur unterliegenden Drahtlage der Parallelschlaglitze. Damit war die prozentuale Reduzierung der maximalen Beanspruchung des Außendrahtes der Außenlitzen nach Tabelle 4 bestimmbar.

Tabelle 4: Reduktion der maximalen Beanspruchung des Außendrahtes

Modell/Bedeutung	Größe	Wert	Ort der max. Spannung
SD_S	$\sigma_3 =$	3232,6 MPa	3L - S
SD_S_KS	$\sigma_3 =$	2011,7 MPa	3L - 2L2
Reduktion	$\Delta\sigma_3 =$	-37,8 %	

Auf Grund der kreisförmigen Abbildung der Drahtquerschnitte im FE-Modell sowie der Betrachtung des gesamten Drahtseilquerschnitts als Verbund paralleler Zylinder mit einer Einheitsdicke war die qualitative Änderung der Druckspannung durch die Ummantelung eines Drahtseiles mit einer Kunststoffhülle zulässig. Unter dieser Voraussetzung konnte die nach Methode „Leipzig“ ermittelte äußere Druckspannung des konventionellen Drahtseiles  $\sigma_{daK}$  um den prozentualen Anteil der Änderung der maximalen Spannung  $\Delta\sigma_3$  gemindert werden. Somit war die Ermittlung der Druckspannung für den Außendraht eines kunststoffummantelten Drahtseiles  $\sigma_{daU}$  möglich. Mit diesem reduzierten Wert konnte die Abschätzung der ertragbaren Biegewechselzahl bis zum Erreichen der Ablegereife bzw. des Litzenbruchs nach Methode „Leipzig“ erfolgen. Tabelle 5 zeigt die geminderte Druckspannung der Außendrähte sowie die ermittelten Biegewechselzahlen für ein kunststoffummanteltes Drahtseil. Der Vergleich mit den Biegewechselzahlen eines konventionellen Seiles lieferte eine Erhöhung der Betriebs- bzw. Lebensdauer des Seiles infolge der Ummantelung um ca. 40%.

Tabelle 5: Auswirkung der Kunststoffummantelung auf die Abschätzung der Biegewechselzahl nach Methode „Leipzig“

Bedeutung	Größe	S = 15,0 kN	S = 22,4 kN
Druckspannung (konventionell)	$\sigma_{daK} =$	176,3 MPa	215,5 MPa
Druckspannung (ummantelt)	$\sigma_{daU} =$	109,7 MPa	134,0 MPa
Ablegereife außen (konventionell)	$N_{aK}^{(Z) 10\%} =$	25.052	13.497
Ablegereife außen (ummantelt)	$N_{aU}^{(Z) 10\%} =$	34.377	18.814
Änderung Ablegereife außen	$\Delta N_a^{(Z) 10\%} =$	+37,2 %	+39,4 %
Litzenbruch außen (konventionell)	$N_{aK}^{3\%} =$	33.029	17.119
Litzenbruch außen (ummantelt)	$N_{aU}^{3\%} =$	46.228	24.365
Änderung Litzenbruch außen	$\Delta N_a^{3\%} =$	+40,0 %	+42,3 %

Im Rahmen der FE-Simulation des dreidimensionalen FE-Modells wurde die Seilkonstruktion bis zum 6x7-Litzenseil untersucht. Entsprechend dieser Konstruktion wurde nachfolgend der Einfluss der Kunststoffummantelung auf die Betriebs- und Lebensdauer nach dem Abschätzungsansatz der Methode „Leipzig“ betrachtet. Dabei wurde der Fokus auf die äußere Kontaktzone des Seiles mit der Seilscheibe sowie auf den inneren Kontaktbereich der Außenlitzenlage mit der Kernlitze gelegt.

Abbildung 31 zeigt den äußeren Kontaktbereich des 6x7-Litzenseiles. Auch in diesem Modell war die Reduzierung der Druckspannung deutlich erkennbar. Zusätzlich wurde die breite Verteilung der Belastung infolge der Kunststoffummantelung auf die nebenliegenden Lagendrähte visualisiert.



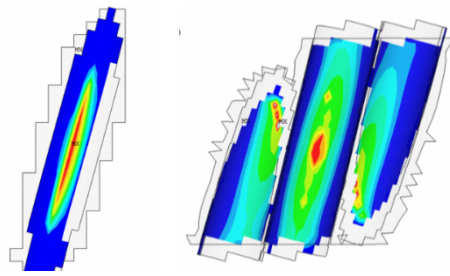


Abbildung 31: Äußerer Kontaktbereich im Modell des 6x7-Litzenseiles; a) konventionelles Modell; b) kunststoffummanteltes Modell

Aufgrund der starken Minderung der maximalen Spannung im äußeren Kontaktbereich verschob sich der Ort der maximalen Spannung bei Kunststoffummantelung von der in Kontakt zur Scheibe befindlichen Außenseite des Außendrahtes (4626 MPa) in den Kontaktbereich des Außendrahtes zum unterliegenden Kerndraht (1568 MPa). Damit wurde die Reduzierung der maximalen Beanspruchung des Außendrahtes der Außenlitzten nach Tabelle 6 bestimmbar. Zusätzlich wurde auch die Reduzierung der maximalen Spannung im inneren Kontaktbereich zwischen den Litztenlagen dargestellt.

Tabelle 6: Reduktion der maximalen Spannung am Modell des 6x7-Litzenseiles

Modell/Bedeutung	Größe	Kontakt außen		Kontakt innen	
		Wert	Ort $\sigma_{max}$	Wert	Ort $\sigma_{max}$
konventionell	$\sigma_3$	4626,0 MPa	ML - S	1520,4 MPa	KL - ML
ummantelt	$\sigma_3$	1568,4 MPa	ML KD - LD	269,1 MPa	KL - ML
Reduktion	$\Delta\sigma_3$	-66,1 %		-82,3 %	

Mittels dieser Reduzierung konnte die nach Methode „Leipzig“ ermittelte äußere Druckspannung  $\sigma_{daK}$  sowie die innere Druckspannung  $\sigma_{diK}$  des konventionellen Drahtseiles um den prozentualen Anteil der Änderung der maximalen Spannung  $\Delta\sigma_3$  gemindert werden. Somit wurde die Ermittlung der Druckspannung für den Außendraht  $\sigma_{daU}$  sowie die Druckspannung für den inneren Drahtkontakt  $\sigma_{diU}$  eines kunststoffummantelten Seiles möglich. Mit diesem reduzierten Wert konnte die Abschätzung der ertragbaren Biegewechselzahlen bis zum Erreichen der Ablegereife bzw. des Litztenbruchs nach Methode „Leipzig“ für beide Betrachtungszonen erfolgen. Die zur Abschätzung mit Methode „Leipzig“ notwendigen Parameter des 6x7-Litzenseiles wurden aus den Seildaten des 6x26WS-Litzenseiles extrahiert und ggf. überschlagen. Zudem erfolgte die Anpassung der Seiltriebdetails auf die Parameter des 6x7-Litzenseiles.

Tabelle 7 zeigt die geminderte Druckspannung des äußeren Kontaktbereichs sowie die abgeschätzten Biegewechselzahlen für ein kunststoffummanteltes 6x7-Litzenseil. Der Vergleich mit den Biegewechselzahlen eines konventionellen Seiles lieferte eine Erhöhung der Betriebsdauer um ca. 41 % sowie der Lebensdauer um ca. 44 % infolge der Ummantelung.

Tabelle 7: Auswirkung der Kunststoffummantelung auf die Abschätzung der Biegewechselzahl nach Methode „Leipzig“ im äußeren Kontaktbereich

Bedeutung	Größe	Wert
Druckspannung außen (konventionell)	$\sigma_{daK}$	= 140,2 MPa
Druckspannung außen (ummantelt)	$\sigma_{daU}$	= 47,5 MPa
Ablegereife außen (konventionell)	$N_{aK}^{(Z) 10\%}$	= 8.810
Ablegereife außen (ummantelt)	$N_{aU}^{(Z) 10\%}$	= 12.378
Änderung Ablegereife außen	$\Delta N_a^{(Z) 10\%}$	= +40,5 %
Litzenbruch außen (konventionell)	$N_{aK}^{3\%}$	= 10.881
Litzenbruch außen (ummantelt)	$N_{aU}^{3\%}$	= 15.615
Änderung Litzenbruch außen	$\Delta N_a^{3\%}$	= +43,5 %

Tabelle 8: Auswirkung der Kunststoffummantelung auf die Abschätzung der Biegewechselzahl nach Methode „Leipzig“ im inneren Kontaktbereich

Bedeutung	Größe	Wert
Druckspannung innen (konventionell)	$\sigma_{diK}$	= 233,7 MPa
Druckspannung innen (ummantelt)	$\sigma_{diU}$	= 41,4 MPa
Ablegereife innen (konventionell)	$N_{iK}^{(Z) 10\%}$	= 6.424
Ablegereife innen (ummantelt)	$N_{iU}^{(Z) 10\%}$	= 12.671
Änderung Ablegereife innen	$\Delta N_i^{(Z) 10\%}$	= +97,2 %
Litzenbruch innen (konventionell)	$N_{iK}^{3\%}$	= 7.779
Litzenbruch innen (ummantelt)	$N_{iU}^{3\%}$	= 16.008
Änderung Litzenbruch innen	$\Delta N_i^{3\%}$	= +105,8 %

Tabelle 8 zeigt die geminderte Druckspannung und Biegewechselabschätzung des inneren Kontaktbereichs. Der Vergleich mit den Biegewechselzahlen eines konventionellen Seiles lieferte eine Erhöhung der Betriebsdauer um ca. 97 % sowie der Lebensdauer um ca. 105 % infolge der Ummantelung des Seiles mit einer Kunststoffschicht. Des Weiteren wurde festgestellt, dass die Biegewechselzahl der inneren Schädigungszone an die Abschätzung der äußeren Biegezone angeglichen wurde. Die Methode „Leipzig“ stufte die innere Schädigung der vorliegenden Seilkonstruktion als dominierend ein. Die Ummantelung veränderte dieses spezifische Verhalten erheblich.

Im Rahmen der Untersuchungen konnten die Auswertungen der FE-Simulationen in der Abschätzung der Betriebs- und Lebensdauer nach der Methode „Leipzig“ angewandt werden. Die prozentuale Reduzierung der maximalen Druckspannung aus den FE-Simulationen wurde in die Abschätzungsrechnung eingepflegt. Die Beanspruchung der Seildrähte infolge der Zug- und Biegebelastung des Seiles blieben auch bei kunststoffummantelten Drahtseilen auf dem Niveau des konventionellen Seiles. Die Erhöhung der Betriebs- und Lebensdauer für die untersuchten Seilkonstruktionen war mittels der Methode „Leipzig“ möglich. Der Vergleich zu den experimentellen Untersuchungen im Rahmen der Untersuchungen war schwierig. Auf Grund der Kalibrierung der Seilkonstruktion wurden Eigenschaften des Prüfseiles verändert, welche mittels FEM nicht darstellbar waren. Die Tendenz und die Größenordnung des Einflusses der



Kunststoffummantelung des Drahtseiles auf die Betriebs- und Lebensdauer konnte dennoch abgebildet werden.

## 6 FAZIT UND ZUSAMMENFASSUNG

Der Einfluss einer zusätzlichen Kunststoffummantelung um ein konventionelles Drahtseil auf die Lebensdauer wurde in experimentellen, numerischen und analytischen Untersuchungen betrachtet.

Im Rahmen der experimentellen Untersuchungen konnten weitere Erfahrungswerte generiert werden. Zusätzlich wurden Erkenntnisse über die Verteilung der Seilschädigung im äußeren und inneren Bereich erarbeitet. Durch die Testung mehrerer D/d-Verhältnisse und Laststufen konnte das Verhalten des Drahtseiles sowie der Kunststoffummantelung unter variablen Parametern begutachtet werden.

Mit Hilfe der FE-Simulationen von zwei- und dreidimensionalen FE-Modellen der Seilgeometrie konnte die Beanspruchung der Seildrähte infolge des Laufes über Seilscheiben dargestellt werden. Insbesondere die Begutachtung der Beanspruchung im Inneren des Seiles stellte einen wichtigen Erkenntnisgewinn zur Einschätzung des Schädigungsverhaltens kunststoffummantelter Drahtseile dar. Der innenliegende Zustand der Einzeldrähte oder der Litzen in Richtung Seilmittelpunkt kann optisch nicht überprüft werden. Messtechnische Untersuchungen mittels magnetinduktiver Prüfung geben keinen Aufschluss über den genauen Ort und die Größe der Drahtbeanspruchung. Die Ergebnisse der Simulationen bieten einen Ansatzpunkt zur Gestaltung der Bewertung der Seilschädigung kunststoffummantelter Drahtseile.

Rechnerische Methoden zur Abschätzung von Betriebs- und Lebensdauer laufender Drahtseile ließen eine sinnvolle Betrachtung kunststoffummantelter Drahtseile bisher nicht zu. Der Abschätzungsansatz der Methode „Leipzig“ basiert auf den einzelnen Zug-, Druck- und Biegespannungen der Seildrähte. Infolge der Kunststoffummantelung des Seiles verschob sich der Ort und die Größe der maximalen Druckspannungsbeanspruchung im Seilverbund. Durch die Erkenntnisse zur Druckspannungsverteilung in ummantelten Seilen aus den FE-Simulationen konnte die Reduzierung der Druckspannung rechnerisch in die Methode „Leipzig“ eingepflegt werden.

## LITERATUR

- [DIN77] DIN 15061-1: Deutsche Norm – *Hebezeuge – Rillenprofile für Seilrollen*; Beuth Verlag; Berlin; 1977
- [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.
- [Jen92] Jenner, T.: *Geometrie von Drahtseilen*; Dissertation; Universität Stuttgart; 1992
- [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](mailto: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](mailto:thorsten.schmidt@tu-dresden.de)