



TU Clausthal

Clausthal University of Technology

Potentiale sowie Auswirkungen von Hochfestfaserseilen auf mehrlagig bewickelten Seiltrommeln im Bergbau-, Offshore- als auch Kranbereich

A. Lohrengel, K.Stahr, M.Wächter

Technical Report Series

Fac3-13-02



Faculty of
Mathematics/Computer Science
and Mechanical Engineering
Clausthal University of Technology

Impressum

Publisher: Fakultät für Mathematik/Informatik und Maschinenbau,
Technische Universität Clausthal
Leibnizstraße 32, 38678 Clausthal-Zellerfeld, Germany

Editor-in-chief: Alfons Esderts

Technical editor: Martina Wächter

Contact: martina.waechter@tu-clausthal.de

URL: <http://www.fakultaet3.tu-clausthal.de/forschung/technical-reports/>

ISSN: 1869-8018

The Faculty of Mathematics/Computer Science and Mechanical Engineering Review Board

Prof. Dr. Frank Endres

Prof. Dr. Alfons Esderts

Prof. Dr. Stefan Hartmann

apl. Prof. Dr. Günter Kemnitz

Prof. Dr. Armin Lohrengel

Prof. Dr. Norbert Müller

Prof. Dr. Volker Wesling

Potentiale sowie Auswirkungen von Hochfestfaserseilen auf mehrlagig bewickelten Seiltrommeln im Bergbau-, Offshore- als auch Kranbereich

Prof. Dr.-Ing. A. Lohrengel
Dipl.-Ing. K. Stahr
Dipl.-Ing. M. Wächter

TU Clausthal - Institut für Maschinenwesen
Robert-Koch-Straße 32
D-38678 Clausthal-Zellerfeld
+495323/72-2270

Abstract

Ungeachtet der Tatsache des Nichtvorhandenseins adäquater Einsatzrichtlinien sowie Dimensionierungsgrundlagen für Seiltriebe unter Nutzung hochfester synthetischer Faserseile ist deren Einsatz sowie die Substitution bewährter Drahtseilderivate auf bestehenden Windenanlagen gängige Praxis. Insbesondere im maritimen Bereich macht man sich somit bereits die Vorteile moderner Fasergeflechte hinsichtlich eines dem Drahtseil gegenüber reduzierten Längengewichtes, Korrosionsbeständigkeit, Umweltschonung, Ergonomie sowie Personenschutz zunutze.

In fördertechnischen Anwendungen unter Tage (Bergbau), offshore (Tiefseefördertechnik) als auch an Land (Krane, Mobilkrane) wird die Nutzbarmachung angestrebt, da das hohe Eigengewicht moderner Drahtseile die Möglichkeiten hinsichtlich Fördermenge und -tiefe insbesondere in den Bereichen Mining als auch offshore derzeit begrenzen. Aufgrund vergleichbarer Festigkeit bei lediglich einem Bruchteil des Gewichtes stellen moderne Faserseile hier enorme Potentiale in Aussicht.

Die aus hochfesten Polymerfasern hergestellten Seile weisen zum Teil mit Stahldrahtseilen jedoch nur bedingt vergleichbare Eigenschaften auf, aus denen neue Anforderungen an die Dimensionierung der Tragmittel aber auch der eingesetzten Hebe- und Förderzeuge, z.B. bei einer Mehrlagenwicklung, erwachsen. Diese sind jedoch bisher nicht umfassend untersucht und bewertet. Mehrere Autoren beschreiben bereits grundlegend quantitativ durchaus nennenswerte Eigenschaften der Faserseile wie Durchmesserminimierung unter Last, Verformung unter Querbelastung, Abhängigkeiten der Gegenkörpergeometrie sowie hierbei zu berücksichtigende Reibungsverhältnisse - jedoch meist beschränkt auf den Einsatzfall beim Lauf über Scheiben in der Rundrille und im Hinblick einer resultierenden Veränderung der Seillebensdauer. Die Auswirkung der genannten Phänomene auf das Beanspruchungsverhalten der mehrlagig bewickelten Seiltrommel ist bis dato ungeklärt und hat nachweislich einen nicht zu vernachlässigenden Einfluss.

Der vorliegende Artikel beschreibt nach [Loh13a], [Loh13b] grundsätzliche relevante Besonderheiten beim Einsatz von Faserseilen im Zuge der (Mehrlagen-)Wicklung wie bspw. Durchmesseränderung, Verformung, Ovalisierung, Querelastizitätsmodul sowie zu berücksichtigender Reibungsverhältnisse, bewertet deren Einfluss im Zuge der Dimensionierung mehrlagig bewickelter Seiltrommeln und überführt die Grundlagenkenntnisse in einen realen Anwendungsfall.

Although there are no guidelines for dimensioning and usage of rope drives using high-strength synthetic fibre ropes, their use and the substitution of proven wire rope types on existing rope drums are already common practice. Maritime applications already make use of the advantages of modern fibre braids versus wire ropes concerning their reduced weight per length, improved corrosion resistance, environmental protection as well as industrial health and safety.

In handling and conveying applications such as deep shaft mining, deep-sea lifting as well as mobile lifting the utilization is desirable, as the high weight of wire ropes currently limits the possibilities regarding lifting capacity and depth, especially in areas as mining and offshore. With comparable strength at only a fraction of the weight, ropes made of high performance fibers provide an enormous potential in respect thereof.

However, the characteristics of high-strength polymer fibre ropes can only be partially compared to wire ropes and this leads to new requirements for lifting and handling equipment. The quantitatively significant characteristics of fibre ropes (e.g. diameter reduction under longitudinal load, deformation under lateral load, dependence of counter-body geometry and frictional conditions) have already been described by several authors, although these descriptions have been mostly restricted to BOS applications with semi-circular grooves and deal primarily with the resulting change in rope fatigue. However, the effect of these phenomena on the strain scenario of multi-layer wound rope drums remains unclear, yet significant. In accordance with [Loh13a], [Loh13b], this paper describes the application and simulation of fibre ropes in view of (multi-layer) winding on rope drums while considering, for example, diameter reduction, deformation, ovalisation, lateral modulus of elasticity as well as scenarios regarding friction to be considered and analyses their impact on analytical dimensioning principles, which is then transferred to numerical finite element simulations of actual applications.

1 Das bislang vermutete Beanspruchungsszenario mehrlagig bewickelter Windentrommeln mit Faserseilen

Das Institut für Maschinenwesen beschäftigt sich schon seit vielen Jahren mit der Thematik der Seileigenschaften und den daraus resultierenden Einflüssen auf die Trommelkonstruktion bei einer Bewicklung mit Drahtseilen. In letzter Zeit kommen verstärkt Kunststoffseile aus aromatischem Polyamid oder Polyethylen in Hybrid- oder reiner Kunststoffbauart auf den Markt als auch zum Einsatz bei mehrlagiger Bewicklung von Seiltrommeln [Reb06], [Ohe06]. Die Einflussnahme auf das Trommelverhalten infolge der andersartigen Seileigenschaften ist aber noch weitestgehend unbekannt. Mehrere Schadensfälle an mit hochfesten Faserseilen bewickelten Windentrommeln bestätigen hier einen Bedarf und legen weitere Untersuchungen auf diesem Gebiet nahe.

Mit dem Einsatz von Kunststoffseilen auf Seiltrieben steht man demzufolge heute vor einem ähnlichen Problem wie Anfang der 90er Jahre auf dem Gebiet der Drahtseile. Es kam vermehrt zu Schäden an Seiltrommeln, die nach dem damals gegenwärtigen Stand der Technik ausgelegt worden waren. Untersuchungen zeigten seinerzeit, dass die Ursache hierfür in nicht mehr zeitgemäßen Daten für die Querelastizitätsmoduln der Seile lag. Ein ähnliches Szenario bietet sich derzeit im Bereich der so genannten hochfesten Faserseile. Während offensichtliche Vorteile hinsichtlich Gewicht und Handhabbarkeit den Endkunden sofort überzeugen, besteht für ihn jedoch gleichzeitig oftmals ein Mangel hinsichtlich technischem Support und Materialverständnis insbesondere für hochfeste Faserseile höheren Nenndurchmessers.

Während das Kriechverhalten von Kunststoffseilen, deren Biegegewichselfestigkeit und Längselastizität bereits ansatzweise erforscht wurden, lagen über das allgemeine Verhalten von Kunststoffseilen auf Windentrommeln und die Quersteifigkeit dieser Seile bei mehrlagiger Bewicklung bisher keine belastbaren Erkenntnisse vor. Eine gezielte Optimierung der Quersteifigkeit von Kunststoffseilen im Hinblick auf deren möglichst günstige Speicherung ist deshalb bis jetzt nur sehr bedingt durchführbar. Ebenfalls werden entscheidende Parameter für eine gezielte Anpassung des Windentrommeldesigns an die Erfordernisse der Kunststoffseile bisher nicht berücksichtigt.

Ebenfalls ungeklärt ist der Einfluss vollsynthetischer Seile auf die Windentrommelbeanspruchungen im Zuge einer Mehrlagenbewicklung. Um das gesamte Potential der Kunststoffseile auch unter Tage (Bergbau), offshore (Tiefseefördertechnik) als auch an Land (Krane, Mobilkrane) nutzbar zu machen, ist jedoch eine Mehrlagenwicklung unumgänglich, machen doch gerade die spezifischen Eigenschaften von Kunstfaser- und Hybridseilen sie unter anderem für Anwendungen mit enormen Seillängen durch Vorteile wie eine vergleichbare bis höhere Bruchfestigkeit bei deutlich geringerem Gewicht, sehr interessant (vgl. **Abbildung 1**). Die maximale Tragfähigkeit wird heutzutage in den genannten Anwendungsfällen durch die eingesetzten Stahlseile begrenzt, da diese bei großen Längen aufgrund ihres Eigengewichtes reißen [Sta08]. Moderne so genannte Hochfest-Faserseile stellen diesbezüglich enorme Potentiale in Aussicht.



Abbildung 1: Blair Multi-Rope Double-Drum Winder im Bergbau (links) [Reb11]; Offshore Construction Vessel „Skandi Acergy“ (rechts) [Sub12]

Um das Potential neuartiger, hochmoderner Fasergeflechte auch in der Mehrlagenwicklung nutzbar machen zu können, bedarf es der Berücksichtigung mehrerer Einflussgrößen, die bisher hinsichtlich der Mehrlagenwicklung von Seilen nicht in Erscheinung traten. Die folgenden Kapitel behandeln eine Auswahl nennenswerter Phänomene vor diesem Anwendungshintergrund sowie deren Möglichkeiten zur Quantifizierung und beschreiben deren Auswirkungen auf das Beanspruchungsszenario mehrlagig bewickelter Windentrommeln mit Faserseilen.

1.1 Fallstudie

In [Loh11a] wurde anhand einer analytisch-numerischen Fallstudie beschrieben, wie sich - lediglich unter Berücksichtigung der wesentlich geringeren Elastizitätseigenschaften eines Faserseiles, die mehrlagige Wicklung eines modernen Fasergeflechtes auf das Beanspruchungsszenario der Windentrommel auswirken kann. Die Studie ging dabei von einer (Voll-)Bewicklung einer gegossenen Trommel mit jeweils sechs Seillagen bei einer Seilzugkraft von 20 kN aus. Die Zugmittel wurden hierbei lediglich durch ihre durchaus sehr unterschiedlichen jeweiligen Längs- sowie Quersteifigkeiten charakterisiert. Der mittels Finite-Elemente-Simulation ermittelte resultierende Beanspruchungszustand in beiden Fällen, beschrieben durch die Vergleichsspannung nach v. Mises, ist in **Abbildung 2** dargestellt. Betrachtet wird hierbei die Trommel im Querschnitt, geschnitten entlang der Längsachse, als auch Trommelmantel sowie Bordscheibe im Profil, geschnitten entlang der Hochachse für die genannte exemplarische Drahtseilbewicklung (links) sowie eine Bewicklung mit einem hochfesten Faserseil (rechts). Die Bauteilverformungen werden hierbei zugunsten der Aussagefähigkeit um den Faktor 44 überzeichnet dargestellt.

Wesentliche Unterschiede zwischen beiden prognostizierten Beanspruchungsszenarien bestanden in einer erheblich höheren sowie im Fall von Systemrillung unsymmetrischen Beanspruchung im Trommelmantel und einer Verringerung der Bordscheibenbelastung bei Drahtseilbewicklung gegenüber Faserseilbewicklung.

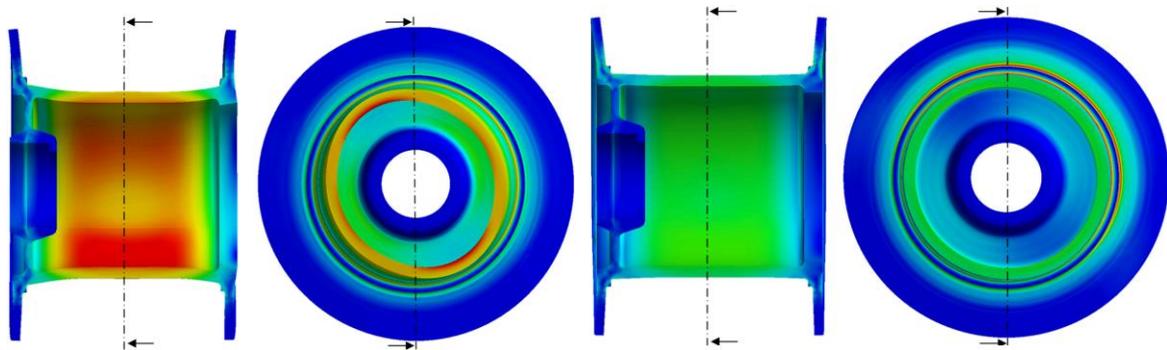


Abbildung 2: Analytisch-numerische Beanspruchungsanalyse einer Windentrommel unter Berücksichtigung unterschiedlicher Eigenschaften hinsichtlich Längs- und Querelastizität für Drahtseil (links) sowie Faserseilbewicklung (rechts)

Die damaligen Betrachtungen beruhten jedoch lediglich auf ersten Annahmen bzw. initiiierenden Untersuchungen hinsichtlich der quantitativen Elastizitätseigenschaften von Faserseilen. Zahlreiche kombiniert analytisch-numerische als auch experimentelle Untersuchungen am Teilsystem Faserseil sowie am Gesamtsystem Seil und Seiltrommel, unter anderem von [Sch11], haben seitdem gezeigt, dass sich das realistische Beanspruchungsszenario mehrlagig mit modernen Faserseilen bewickelter Windentrommeln mitunter erheblich von der kombiniert analytisch-numerischen Prognose unterscheidet. Hierfür können einerseits veränderte Einflussgrößen (bspw. Längs- und Querelastizität, Reibungsverhältnisse etc.), andererseits aber auch für das Drahtseil zwar hinreichende, für Faserseile jedoch unzulängliche Modelle und Annahmen in der analytischen Dimensionierungsgrundlage als Gründe identifiziert werden.

2 Besonderheiten bei der Anwendung hochmoderner Fasergeflechte

Während das Kriechverhalten von Kunststoffseilen, deren Biegewechselfestigkeit sowie Längselastizität bereits ansatzweise erforscht wurden, lagen über das allgemeine Verhalten von Kunststoffseilen auf Windentrommeln bei mehrlagiger Bewicklung bisher keine belastbaren Erkenntnisse vor. Entscheidende Parameter für eine Optimierung an den Teilsystemen Zugmittel sowie Speichermedium zugunsten eines optimierten Gesamtsystems bleiben daher bis dato unberücksichtigt. Insbesondere das Fehlen wissenschaftlich abgesicherter Erkenntnisse über die Eigenschaften von Kunststoffseilen (z.B. Längs- und Querelastizitätsmodul), welche für eine beanspruchungsgerechte Trommeldimensionierung und -gestaltung wichtig sind, vor allem aber auch über deren Verhalten beim Einsatz in Seiltrieben (Spulungsverhalten bei Mehrlagenbewicklung, Stabilität des Seilquerschnitts, Seilanschlägen, Ermüdung, Verschleiß etc.) ist ein wesentlicher Hinderungsgrund für die zügige Einführung neuer, marktreifer Produkte, welche die innovativen Potentiale der Kunststoffseile in vollem Umfang nutzen. Die folgenden Unterkapitel fassen grundlegende Erkenntnisse zum Einsatz von Faserseilen in der Mehrlagenwicklung zusammen und geben wertvolle Einblicke in das Verhalten (hochfester) Faserseile unter den Bedingungen der Mehrlagenwicklung.

2.1 Zur Querelastizität von Faserseilen

Wie bereits in [Loh09], [Hei12] und [Loh11b] thematisiert ist bei einem Einsatz von Hybrid- und Faserseilen die Kenntnis der Längs- und Querelastizität für die Auslegung der Seiltrommel unabdingbar. Eine Änderung der Seilelastizität in Längs- und Querrichtung beeinflusst direkt die Beanspruchung des Trommelmantels und der Bordscheiben. Ein Forschungsthema ist daher die Darstellung des Einflusses der geänderten Seileigenschaften von Hybrid- und Faserseilen auf die Trommelbeanspruchung mit Hilfe experimenteller, analytischer sowie numerischer Untersuchungen. Der Seilquerelastizitätsmodul hat u.a. Einfluss auf die Ovalisierung des Seilkörpers in der Seilscheibe sowie auf die resultierende Seilpaketsteifigkeit und damit auch auf die Belastung einer ein- oder mehrlagig bewickelten Seiltrommel. Eine Ermittlung der genannten Seileigenschaften für Seile jeglicher Machart ist demnach ein wichtiger Schritt zur Eigenschaftsabsicherung von Seil und Peripherie (Scheibe, Trommel). Um Rückschlüsse auf das Beanspruchungsszenario der Windentrommel bei mehrlagiger Wickelung zu ziehen, wurden daher am Institut für Maschinenwesen (IMW) der TU Clausthal Grundlagenuntersuchungen zur Querelastizität an Kunstfasergeflechten unterschiedlichster Machart sowie Werkstoffauswahl durchgeführt. **Abbildung 3** fasst die Vielzahl der Untersuchungen in Form einer Darstellung des Seilquerelastizitätsmodules über dem Nenndurchmesser der untersuchten Seile zusammen und bietet somit grundlegende Informationen über das Quersteifigkeitsverhalten von Draht- und Faserseilen.

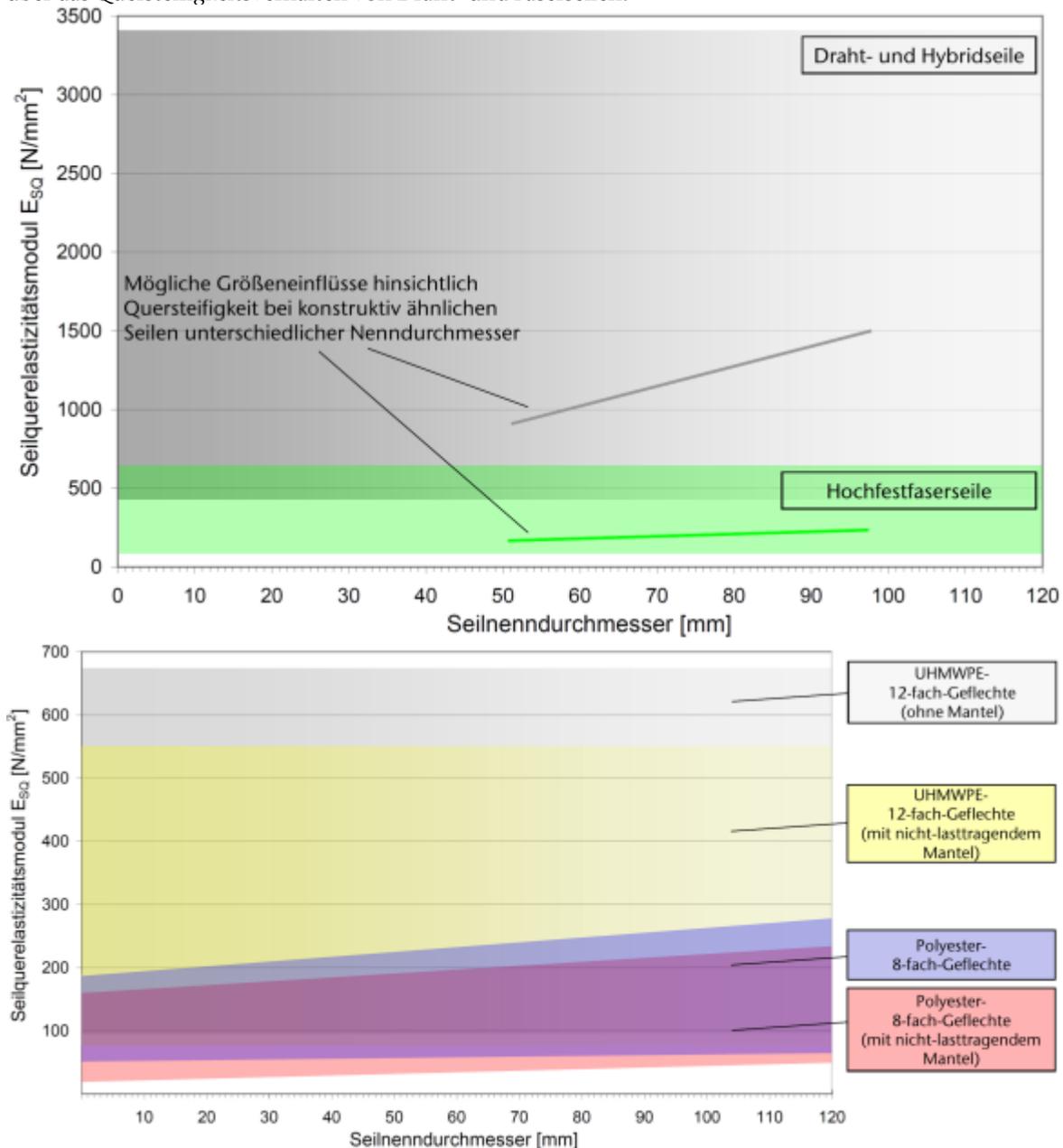


Abbildung 3: Seilquerelastizitätsmodul E_{SQ} über Seilnenndurchmesser für Draht-(oben) sowie Faserseilerivate (unten) unterschiedlichster Machart für eine Längsspannung von 5-50% der nominalen Seilbruchkraft sowie ein Verhältnis D/d von 25

Die Darstellung erfolgt hierbei für gleiche Längskraftverhältnisse $k_{\text{longitudinal}}$ von 5% bis 50% der Seilnennspannung:

$$k_{\text{longitudinal}} = 0.05 \dots 0.5 \cdot \sigma_{\text{longitudinal-nominal}} \quad (1)$$

Ferner ist das Verhältnis der im Versuch aufgebrauchten Querspannung zu Längsspannung k_{lateral} zu beachten:

$$k_{\text{lateral}} = \frac{\sigma_{\text{lateral}}}{\sigma_{\text{longitudinal}}} = 0.06 \quad (2)$$

Das k_{lateral} nach (2) entspricht einem D/d-Verhältnis von ca. 25, somit kann grundsätzlich von einer Vergleichbarkeit der aufgeführten Ergebnisse ausgegangen werden.

Abbildung 3 stellt dar, dass sich die Seilquersteifigkeit von Faserseilen wie bereits in [Loh11a] dargestellt grundsätzlich weit unterhalb der von vergleichbaren Drahtseilen befindet, sodass für den Großteil gegenwärtiger Fasergeflechte vereinfacht von einem in (3) genannten Zusammenhang ausgegangen werden kann:

$$\frac{E_{SQ, \text{fiber-ropes}}}{E_{SQ, \text{wire-ropes}}} \approx 0.1 \quad (3)$$

Desweiteren können grundsätzliche Unterschiede bezüglich des Einflusses von Seilwerkstoff und -konstruktion auf eine resultierende Seilquersteifigkeit identifiziert werden. So weisen beispielsweise aus Polyester hergestellte Seilderivate grundsätzlich eine deutlich geringere Seilquersteifigkeit im Vergleich zu denen aus ultra-hoch-molekularem Polyethylen (UHMWPE) auf. Zugmittel aus Polyester können weiterhin hinsichtlich verschiedener Seilkonstruktion unterschieden werden. So mögen beispielsweise Faserseile mit paralleler Fasereinlage die Konstruktionsdehnung in Längsrichtung gegenüber einem Geflecht verbessern, auf eine resultierende Querelastizität wirkt sich eine derartige Seilkonstruktion bei gleichem Faserwerkstoff jedoch steifigkeitsmindernd aus. Kern-Mantel-Geflechte bieten unter Umständen verbesserte Eigenschaften hinsichtlich Schnitt-, Abrasions- und UV-Beständigkeit. Neben einer im Vergleich zum Standard-Rund- bzw. Hohlgeflecht mitunter schwierigeren Überprüfung der Ablegereife wirkt sich der umgebende, nicht lasttragende Mantel jedoch ebenfalls grundsätzlich und teilweise durchaus nennenswert steifigkeitsmindernd aus. Während bei Draht- wie auch einigen Faserseilen weitestgehend ähnliche Seilkonstruktionen bei Variation des Seilnennendurchmessers durchaus nennenswerte Größeneinflüsse offenbaren, konnten diese bei Geflechtes aus UHMWPE bisher nicht identifiziert werden. Seile dieser Machart zeichnen sich wesentlich durch gleichmäßige und damit berechenbare Eigenschaften in Seilquerrichtung sowie ein breites Spektrum zur Eigenschaftseinstellung aus (**Abbildung 3**). Dies ist insoweit interessant und durchaus erwähnenswert, als dass bei Faserseilen größeren Seilnennendurchmessers oftmals von einem Performanceverlust hinsichtlich Bruchkraft sowie Strukturstabilität und somit einem ungünstigen Größeneinfluss berichtet wird [Gre11]. Der Seilquerelastizitätsmodul ist neben dem Seilaufbau abhängig vom Verhältnis der aufgebrauchten Querkraft bezogen auf die Längskraft im Seil sowie dem Verhältnis der Seillängskraft bezogen auf die Mindestbruchkraft des Seiles [Die71]. Ebenfalls ist die Ausgestaltung der Prüfgeometrie (**Abbildung 8**) in Abhängigkeit des Rillungssystems einer Seiltrommel variabel und entsprechend zu berücksichtigen. Neben einer Veränderung der Trommelbelastungen im Zuge der Mehrlagenwicklung führen die hier identifizierten geringen Seilquersteifigkeiten ebenfalls zu deutlich sichtbaren Phänomenen am Teilsystem Seil, wie beispielsweise einer Ovalisierung des Seilquerschnittes unter Querbelastung. Eine ähnlich dem Stahlseil adäquate Spulbarkeit des Zugmittels auf einer Windentrommel ist aufgrund des geringen Querelastizitätsmodules und somit eintretender Verformungen des Seilquerschnittes dann zumindest unwahrscheinlich.

Dem Ovalisierungsverhalten von Faserseilen im Zuge der Mehrlagenwicklung und somit Querbeanspruchung kommt demnach eine entscheidende Rolle hinsichtlich der Funktion sowie des Beanspruchungsszenarios von Teilsystemen des Seiltriebes zu. Sie stellt somit eine zu berücksichtigende und zu quantifizierende Einflussgröße dar.

2.2 Verformungsverhalten von Faserseilen unter Zug- und/oder Querlast

Die Ovalisierung des Zugmittels unter kombinierter Längs- und Querbelastung in der Rundrille ist bei Draht- wie auch Hybrid- und Faserseilen nach wie vor Gegenstand der Forschung. Bereits [Bec69], [Sch86] und [Fey00] wiesen auf das Phänomen der Querschnittsovalisierung in der Rundrille beim Lauf über Scheiben hin und entwickelten Verfahren zur Berechnung der durch diese Verformung auftretenden Biege- und Torsionsbeanspruchungen im Seil. [Wei05] führte Untersuchungen zum Schädigungsverhalten von Drahtseilen in der Mehrlagenwicklung durch und identifizierte und quantifizierte erstmals den Einfluss der Seilovalisierung hinsichtlich einer zu erwartenden Restlebensdauer. [Vog04], [Mic11] und [Reb06] quantifizierten die Ovalisierung von hochfesten

Faserseilen in der Rundrille, jedoch lediglich für den Lauf über Scheiben vor dem Hintergrund der Seillebensdauer in Abhängigkeit der Rillengeometrie (**Abbildung 4**).

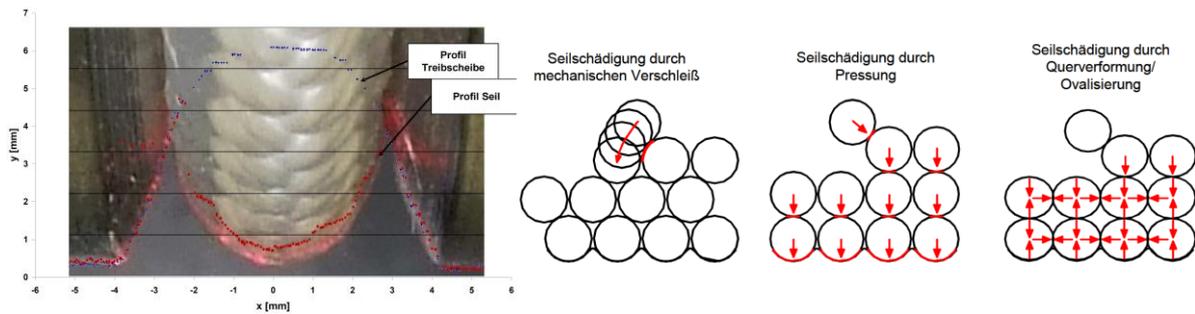


Abbildung 4: Seil- und Rillenprofil in einer Ebene [Mic11] (links) sowie Seilschädigungsmechanismus bei Mehrlagenwicklung [Wei05] (rechts)

Der Effekt der Ovalisierung des Seilquerschnitts ist neben den bereits genannten Größen wie Querelastizität und Durchmesserminimierung eine nennenswerte Einflussgröße hinsichtlich des Beanspruchungsszenarios der Windentrommel. Eine Erfassung und Quantifizierung des temporären sowie bleibenden Ovalisierungsgrades in den einzelnen Lagen einer Mehrlagenwicklung sowie speziell in den Rillungs- und Bordscheibenbereichen ist demnach für eine hinreichende Abschätzung der Auswirkungen dieses Effektes erforderlich. Diesbezügliche Untersuchungen zum Ovalisierungsverhalten von Faserseilen bei Mehrlagenwicklung mittels kontinuierlicher Vermessung des Zugmittels sowie des auf der Trommel befindlichen Wickelpaketes (**Abbildung 5**) zeigen hierbei grundsätzlich ein stark unterschiedliches Ovalisierungsverhalten von Draht- und Faserseilen und quantifizieren diese erstmals. Ebenfalls sind leichte Unterschiede im Ovalisierungsverhalten von Faserseilen im Vergleich zwischen einer Wicklung auf einem unberillten bzw. systemberillten Trommelkörper zu verzeichnen (**Abbildung 6**).

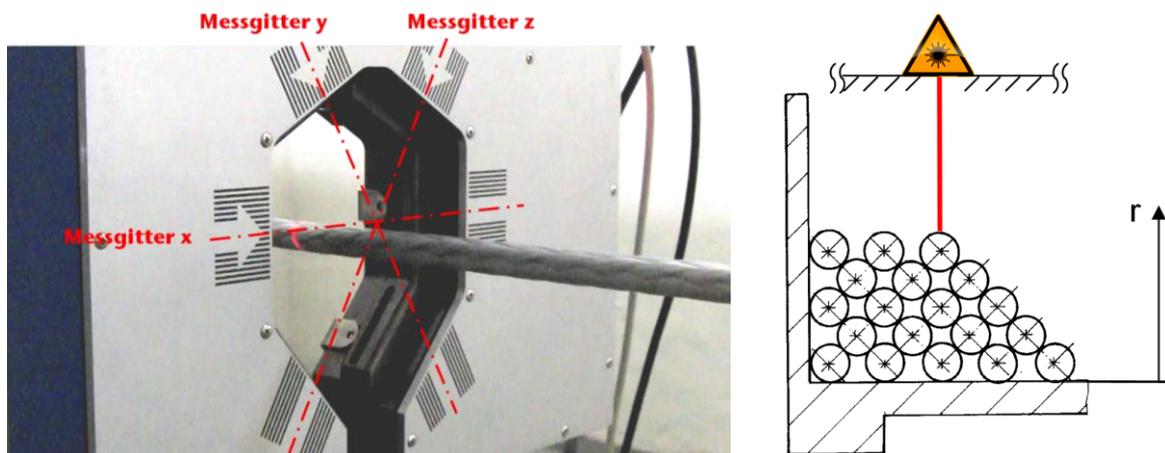


Abbildung 5: Triaxialer Lasersensor zur Erfassung der bleibenden Seilverformung (links) sowie prinzipieller Aufbau zur Vermessung des Seilpaketes mittels Lasertriangulation (rechts)



Abbildung 6: Untersuchte Seil- und Trommelvariationen – Faserseil berillt sowie unberillt, Drahtseil berillt

Als Fallstudie wird hierbei ein vergleichender Wickelversuch zwischen einem 12-fach-HMPE-Hohlgeflecht Dyneema® SK75, verdichtet und verstreckt, Nenndurchmesser 14 mm sowie einem CASAR Eurolift®, drehungsfrei, mit verdichtete Außenlitzen, Nenndurchmesser 14mm herangezogen. Die Seile zeichnen sich unter anderem durch ihren gleichen Nenndurchmesser sowie eine annähernd gleiche Bruchkraft aus. Das Zugmittel wurde mit einer konstanten Seilzugkraft von 15% der Mindestbruchkraft in fünf Seilagen auf eine Windentrommel mit einem D/d-Verhältnis von 25 gewickelt. Für das hochfeste Faserseil wurde zur Ermittlung der genannten Kenngröße ebenfalls zwischen einem unberillten sowie einem systemberillten Trommelmantel unterschieden (**Abbildung 6**).

Zugunsten einer Bestimmung des Grades bleibender Ovalisierung im Zuge der Mehrlagenwicklung wurde das Zugmittel nach dem Wickelvorgang unter der Wickellast von der Trommel abgespult und durch ein berührungsloses, dreiachsiges Durchmessererfassungsgerät geführt. Als Kenngröße hinsichtlich der Ovalisierung des Faserseiles dient hierbei die relative Ovalität O_{rel} , die sich konform (4) aus den Messwerten der drei Messgitter ergibt.

$$O_{rel} = \frac{\max(d_x, d_y, d_z) - \min(d_x, d_y, d_z)}{\max(d_x, d_y, d_z)} \quad (4)$$

Das beschriebene Verfahren bietet somit erstmals die Möglichkeit der Erfassung des bleibenden Durchmesserminimierungs- sowie Ovalisierungsverhaltens von Faserseilen im Zuge der Mehrlagenwicklung durch Dreiachsmessung nach dem Prinzip der Laserabschattung. **Abbildung 7** fasst die Ergebnisse zur lagen-spezifischen relativen Ovalität O_{rel} der untersuchten Parameterkombinationen zusammen.

Die Untersuchungen zur bleibenden Ovalisierung von Seilen in der Mehrlagenwicklung zeigen, dass bei Faser- als auch Drahtseilen neben einem elastischen Verformungsanteil ebenfalls von einem Großteil bleibender Ovalisierung auszugehen ist. Der ermittelte Ovalisierungsgrad steht hierbei in Abhängigkeit zur jeweiligen Wickellage und prägt sich erwartungsgemäß bei Faserseilen im Vergleich zu Drahtseilderivaten sehr viel stärker aus.

Der bereits vielfach untersuchte Einfluss der Rillenform auf die Seilovalisierung beim Lauf über Seilscheiben wird ebenfalls im Zuge der Mehrlagenwicklung deutlich. Während bei einem berillten Trommelkörper in den meisten Fällen von einem linearen Abfall des Ovalisierungsgrades in Abhängigkeit der Lagenzahl ausgegangen werden kann, verläuft dieser bei Verwendung eines unberillten Trommelkörpers degressiv, es treten insbesondere in den unteren Wickellagen höhere Ovalisierungsgrade des Zugmittels auf.

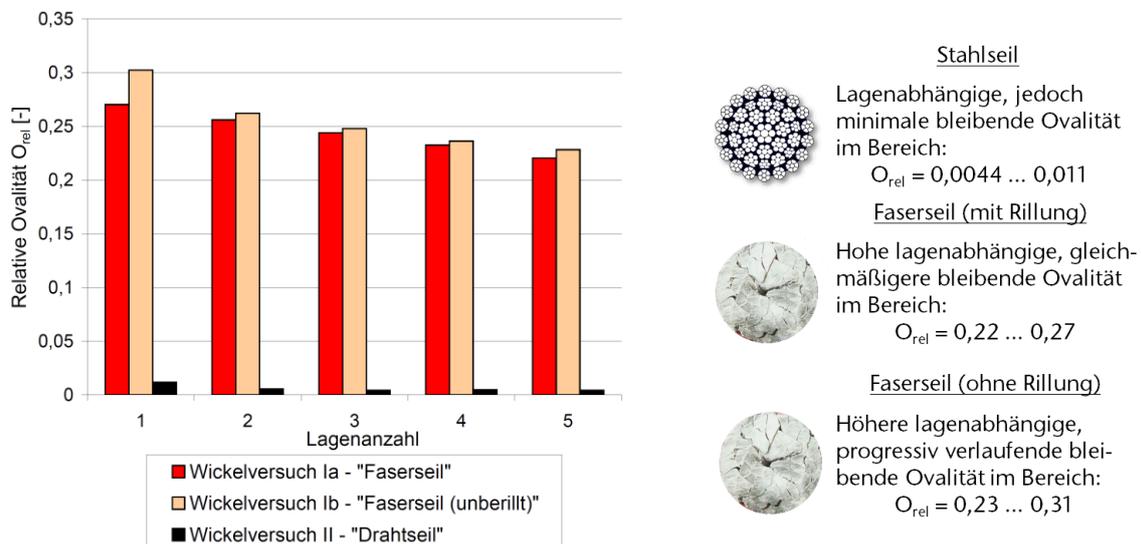


Abbildung 7: Lagenspezifische relative Ovalität O_{rel} der untersuchten Seilderivate in Abhängigkeit der Lagenanzahl

Der hier dargestellte Fall ist exemplarisch und stellvertretend für eine Vielzahl in dieser Hinsicht durchgeführter Untersuchungen. Bisherige Studien legen dar, dass im Fall der Mehrlagenwicklung von Faserseilen grundsätzlich von einer Ovalisierung des Zugmittels ausgegangen werden muss. Diese stellt sich neben einer Abhängigkeit von Faserwerkstoff sowie Seilkonstruktion ebenfalls als Funktion der Seilzugkraft sowie des Wickelradius dar und ist demnach ebenfalls durch die bereits zuvor in (1) bzw. (2) genannten Längs- und Querkraftverhältnisse beschreibbar. Ebenfalls kann grundsätzlich von einer Nichtlinearität des Ovalisierungsgrades sowie einem je nach Anwendung sinnvollerweise zu berücksichtigenden „Grenzwert“ ausgegangen werden.

Gegenwärtige Untersuchungen setzen es sich zum Ziel, den Seilovalisierungsgrad im genannten Parameterfeld für unterschiedliche Faserseilderivate anhand von Gesetzmäßigkeiten charakterisieren zu können. Hier stellt sich zunächst die Aufgabe, den Ovalisierungsgrad eines Seiles im Zuge der Mehrlagenwicklung mit Hilfe einer Versuchsvorrichtung praxisnah und reproduzierbar zu ermitteln. Die Forderungen nach Praxisnähe und Reproduzierbarkeit divergieren dabei. Um eine Reproduzierbarkeit der Ergebnisse zu erhalten, müssen einzelne Einflüsse eliminiert oder überschaubar gemacht werden können. Praxissechte Werte durch Versuche an einer Trommel unter Betriebsbedingungen enthalten dagegen derart viele Einflussgrößen, dass ihre Gewichtung nicht möglich ist.

Im Zuge von Untersuchungen hat sich herausgestellt, dass die experimentelle Bestimmung des Ovalisierungsgrades hinreichend in einem ebenen Versuch nachgebildet werden kann, welcher einen Kompromiss hinsichtlich der angesprochenen Probleme darstellt. Entsprechende Prüfeinrichtungen bestehen beispielsweise in Form des stationären Seilprüfstandes am Institut für Maschinenwesen der TU Clausthal (**Abbildung 8**).

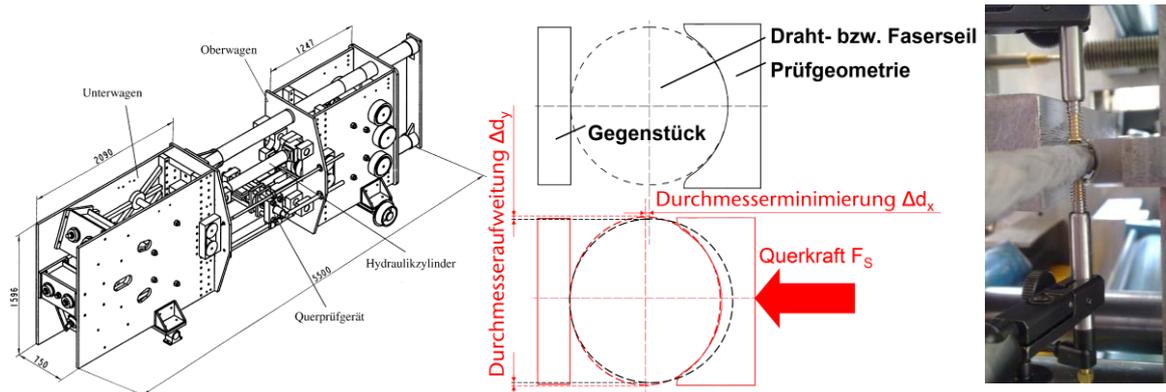


Abbildung 8: Prüfstand am IMW zur Bestimmung der Seileigenschaften in Längs- und Querrichtung

Ebenfalls scheint es vorstellbar, dass die derzeit lediglich für Drahtseile avisierte internationale Norm ISO 16839 („Steel wire ropes - Determination of the compliance characteristics of steel wire ropes subjected to lateral load“) bereits inhaltlich einen möglichen Prüfablauf spezifiziert, der ebenfalls als Grundlagenversuch zur Bestimmung eines Grades der Seilovalisierung heran gezogen werden kann.

2.3 Reibungsverhältnisse im Kontakt Seil und Seiltrommel

Ein zu berücksichtigender Reibkoeffizient des Zugmittels in der (Rund-)Rille war und ist bei Draht-, Hybrid- wie auch Faserseilen Gegenstand der Forschung. Diese bezieht sich vorrangig auf Fragestellungen vor dem Hintergrund der Treibfähigkeit eines Seiles bei so genannten Treibscheibenantrieben, ist sie doch von Bedeutung für die Größe der auf das Zugmittel übertragbaren Kraft. Jedoch kommt dem Einfluss Reibung ebenfalls im Zuge der Trommelmehrlagenwicklung eine nennenswerte Bedeutung hinsichtlich durch das Wickelpaket resultierender Bordscheibenlasten zu. Hier wird vorrangig zwischen zwei Kontaktbereichen unterschieden: dem Kontakt zwischen benachbarten Seilwindungen im Seilpaket sowie dem Kontakt zwischen Seil und Seiltrommel (**Abbildung 9 oben, links**).

[Ver98] gibt für zu berücksichtigende Reibbeiwerte in den genannten Kontaktbereichen einen Anhaltswert von $\mu = 0,18$ für gefettete Drahtseile, der bislang beim Einsatz von Drahtseilen zu einer sehr guten Übereinstimmung von Aussagen der Trommeldimensionierungsgrundlage nach [Mup01] mit der Praxis führt. In [Shi89] wird die Reibpaarung Drahtseil-Kunststoffrolle betrachtet sowie eine Abhängigkeit der Kenngröße Reibkoeffizient von Gleitgeschwindigkeit sowie Anpresskraft nachgewiesen. Demnach steigt der Reibkoeffizient in Abhängigkeit von Relativgeschwindigkeit sowie Anpresskraft.

Für Faserseile nennt [Ohe12] zu berücksichtigende Reibbeiwerte beim Lauf über Scheiben und unterscheidet zwischen trockener $\mu = 0,2$ sowie nasser Gleitreibung $\mu = 0,15$. Des Weiteren wird auf die unter Umständen reibungserhöhende Wirkung in Abhängigkeit der Rillenform hingewiesen. [Hea04] nennt Gleitreibwerte für Faserseile verschiedener Materialien auf Stahl im Bereich $\mu = 0,08$ bis $0,17$.

Gegenwärtige Ansätze am IMW bestehen darin, die Reibverhältnisse im Kontakt Seil-Seiltrommel anhand eines ebenen Versuches hinreichend abzubilden (**Abbildung 9, Mitte**), Haft- und Gleitreibkoeffizienten unterschiedlicher Werkstoffpaarungen unter Variation diverser Versuchsparameter zu ermitteln, diese in der Dimensionierungsgrundlage mehrlagig bewickelter Seiltrommeln realistisch abzubilden sowie zielführende Oberflächenkonzepte zur anwendungsspezifischen Einstellung sinnvoller Reibungsbedingungen zu erarbeiten. Initiierende

experimentelle Untersuchungen zu im Kontaktbereich Seil und Seiltrommel zeigten hierbei zunächst eine grundsätzliche Eignung des Funktionsprinzips sowie eine gute Vergleichbarkeit mit Angaben aus der Literatur (**Abbildung 9, unten**). Aufgrund der starken Varianz der Literaturangaben selbst bei gleichen Materialien, besteht an dieser Stelle unbedingter Untersuchungsbedarf. Gegenwärtig werden am Institut die genannten Kenngrößen für ein weites Parameterfeld experimentell untersucht.

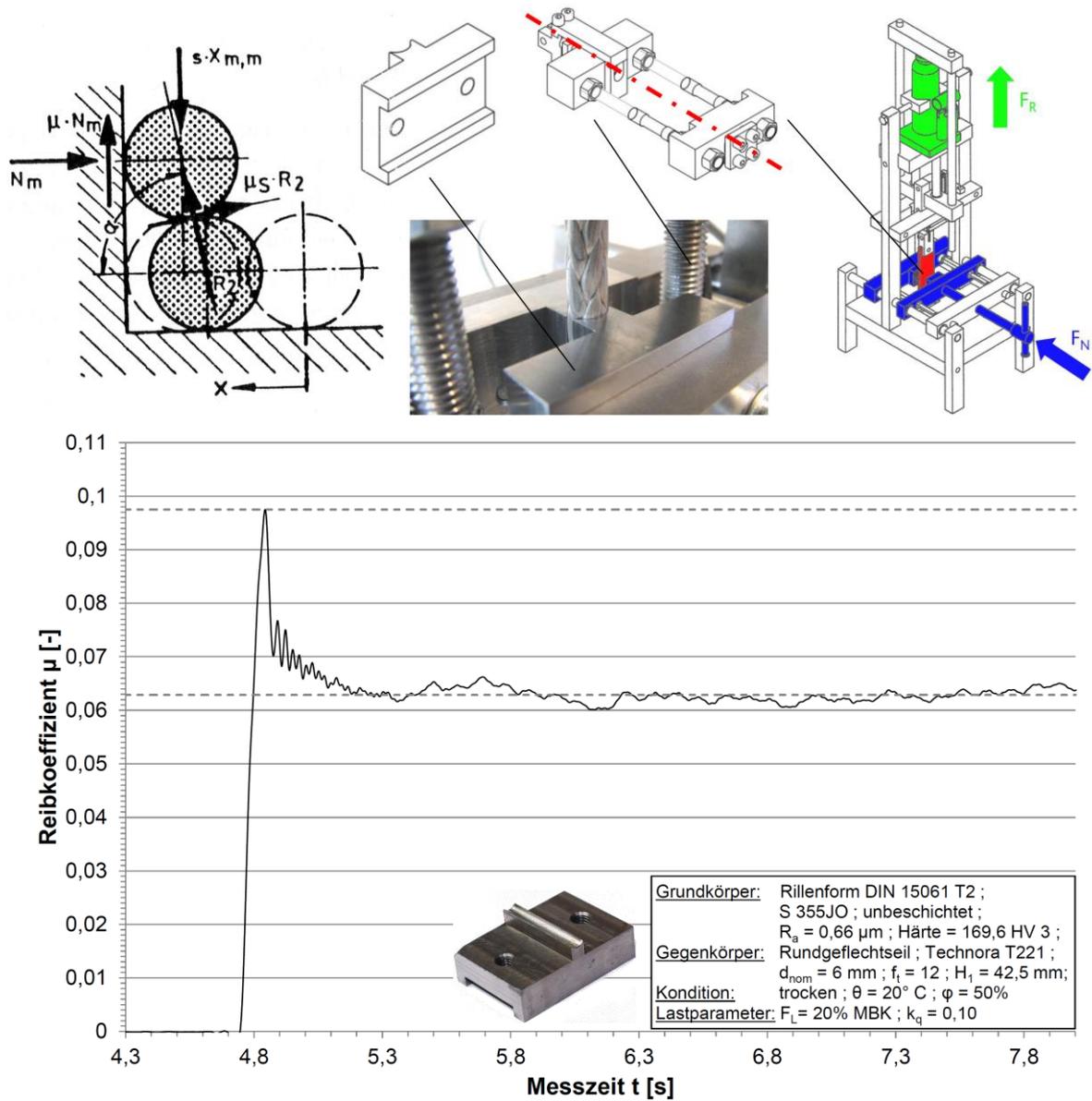


Abbildung 9: Darstellung Kontaktbereiche nach [Die71] (oben links); Aufbau ebener Reibversuch (oben rechts); exemplarische Darstellung des experimentell ermittelten Reibkoeffizient über Reibweg (unten)

3. Auswirkung der genannten Effekte auf das Beanspruchungs- und Wickelverhalten mehrlagig bewickelter Windentrommeln sowie Möglichkeiten der funktions- und beanspruchungsgerechten Gestaltung unter Aspekten des Leichtbaus

Zuvor wurden wesentliche Kenngrößen für das System Seil und Seiltrieb in Form der Seilquerelastizität E_{SQ} , dem Ovalisierungsverhalten sowie der Reibungsverhältnisse im Kontakt Seil-Seiltrommel vor dem Hintergrund einer Faserseilbewicklung beleuchtet. Diese haben nachweislich Auswirkungen auf die Funktion der Seilspeicherung hinsichtlich Wickelqualität sowie des sich einstellenden Beanspruchungsszenarios für die Seiltrommel. Neben einer Kenntnis der Einzelgrößen gilt es jedoch vor allem, die Wechselwirkungen der verschiedenen Einflüsse zu berücksichtigen.

Der im Rahmen der in Kapitel 1.1 erläuterten analytisch-numerischen Fallstudie bereits berücksichtigte sowie in Kapitel 2.1 bestätigte, wesentlich geringere Seilquerelastizitätsmodul moderner Fasergeflechte gegenüber Drahtseilen führt im Beanspruchungsszenario mehrlagig bewickelter Windentrommeln prinzipiell im Wesentlichen zu einer deutlichen Verringerung der Trommelmantelbeanspruchung sowie unter Umständen zu einer Erhöhung der Bordscheibenlasten.

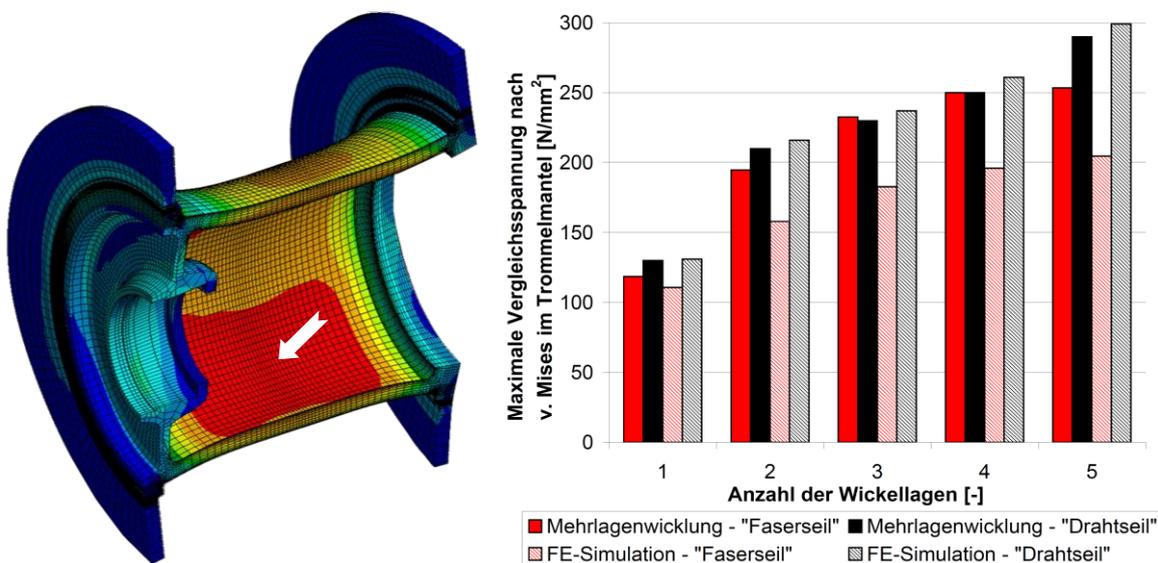


Abbildung 10: Darstellung der Beanspruchungssituation im Trommelmantel in Abhängigkeit der Lagenzahl für Draht- sowie Faserseilbewicklung, experimentell (Trommelmantel mit Systemrillung) sowie kombiniert analytisch-numerisch

In der experimentellen Absicherung dieser Studie anhand eines Wickelversuches des entsprechenden hochfesten Faserseiles konnte zwar mitunter eine Verringerung der Trommelmantelbeanspruchungen gegenüber der Drahtseilbewicklung beobachtet werden, die experimentell ermittelten Werte lagen jedoch zumeist deutlich über den anhand des kombiniert analytisch-numerischen Ansatzes ermittelten Bauteilbeanspruchungen, während der Abgleich Simulation-Experiment für eine Drahtseilbewicklung eine zufrieden stellende bis sehr gute Übereinstimmung lieferte (**Abbildung 10**), vgl. ebenfalls [Sch11]. Die in [Loh11a] sowie Kapitel 1.1 simulativ vermutete deutliche Minderung der Trommelmantelbeanspruchungen bei Faserseilbewicklung stellte sich also nicht ein.

Als ein wesentlicher Grund für dieses Phänomen ist das in Kapitel 2.2 dargestellte Ovalisierungsverhalten in Kombination mit einer Durchmesserminimierung unter Zuglast des verwendeten hochfesten Faserseiles zu identifizieren. Hierfür liefert der in **Abbildung 5 rechts** dargestellte Versuchsaufbau zur Vermessung des Seilpaketes mittels Lasertriangulation den experimentellen Nachweis.

Durch eine Erfassung der Wickelradien in Relation zur Trommelmanteloberfläche für Drahtseilbewicklung sowie Faserseilbewicklung mit bzw. ohne Systemrillung konnte nachgewiesen werden, dass durch die Summe aus inhärenter sowie elastischer Seilovalisierung eine im Vergleich zur Stahlseilbewicklung deutliche Wickelradienminimierung zu verzeichnen ist (**Abbildung 11**).

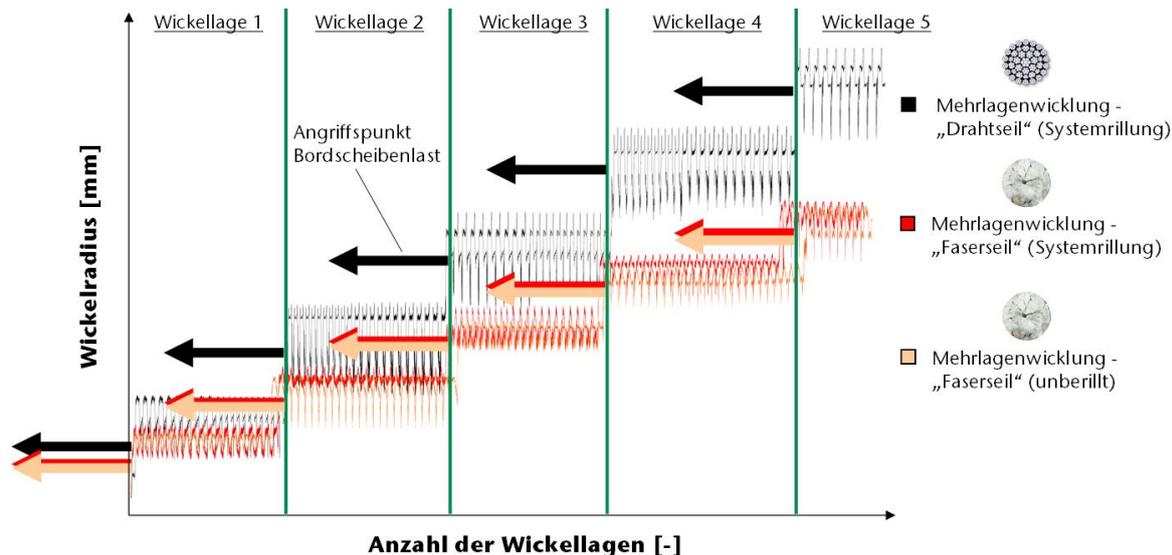


Abbildung 11: Darstellung der experimentell mittels Lasertriangulation ermittelten Wickelradien für Drahtseilbewicklung sowie Faserseilbewicklung mit bzw. ohne Systemrillung

Dieses Phänomen wirkt sich zunächst in zweierlei Form aus: da sich nach [Die71] der durch eine Bewicklung resultierende Wickeldruck auf den Trommelmantel umgekehrt proportional zum Wickelradius verhält, ist eine Wickelradienminimierung zunächst mit einer Erhöhung des Wickeldrucks verbunden. Diese Erkenntnis erklärt die zuvor beschriebene Inkohärenz der Ergebnisse des kombinierten analytisch-numerisch geführten Festigkeitsnachweises (**Abbildung 10**), da der Bestimmung des Wickeldruckes eine geometrisch ideale Kumulation von Seilquerschnittsgeometrien und damit Wickelradien zugrunde liegt, deren Annahme für den Einsatz von Drahtseilen durchaus zutreffend ist. Die zuvor dargestellte und erstmals im Zuge der Mehrlagenwicklung quantifizierte Verformung des Faserseilquerschnittes wird bis dato in diesem Ansatz nicht erfasst. Die Berücksichtigung realer Wickelradien anhand des Seilovalisierungsgrades sowie einer nicht-taktischen Vermessung des Wickelpaketes mittels Lasertriangulation gibt die Möglichkeit zur Ableitung von Verformungsmodellen und durch die Berücksichtigung tatsächlicher Seilquerschnittsgeometrien somit einer realistischen Prognose des durch die Mehrlagenwicklung von Faserseilen resultierenden Wickeldruckes.

Neben einem Einfluss auf den Wickelradius und damit den resultierenden Wickeldruck ist ebenfalls ein nennenswerter Einfluss des Seilovalisierungsgrades auf die Höhe sowie den Kraftangriffspunkt der Bordscheibenlasten zu identifizieren (**Abbildung 12 links**). Der Angriffspunkt der einzelnen Bordscheibenlasten im Zuge einer Faserseilbewicklung liegt hierbei meist auf lediglich 60-65% der Höhe in Relation zur Trommelmanteloberfläche im Vergleich zu denen der einer Drahtseilbewicklung und ist demnach quantitativ durchaus nennenswert. Singulär betrachtet erscheint dieser Effekt zunächst positiv, da der Übergangsbereich zwischen Trommelmantel und Bordscheibe oftmals eine Schwachstelle (Kerbe) der Trommelgestaltung darstellt und durch einen verkürzten Hebelarm grundsätzlich ein geringeres Biegemoment eingeleitet und somit die resultierende Kerbspannung im Übergangsbereich verringert wird (**Abbildung 12 rechts**). Dieser Effekt erscheint vor dem Hintergrund allseits vermuteter hoher Bordscheibenlasten im Zuge der Mehrlagenwicklung von Faserseilen demnach durchaus wünschenswert.

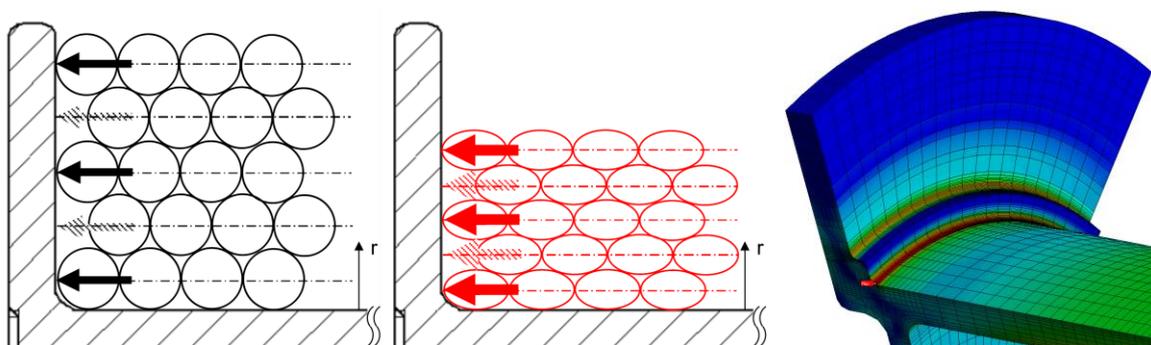


Abbildung 12: Illustration des Kraftangriffspunktes der resultierenden Bordscheibenkräfte sowie höchstbeanspruchte Stelle einer Windentrommelkonstruktion in Form des Übergangsbereiches zwischen Trommelmantel und Bordscheibe in der Finite-Elemente-Simulation

Jedoch ist im Zuge der Faserseilbewicklung ebenfalls von quantitativ nennenswert verringerten Reibkoeffizienten im Vergleich zur Drahtseilbewicklung auszugehen (vgl. Kapitel 2.3), die sich grundsätzlich erhöhend auf die Bordscheibenlasten auswirken. Eine vermeintliche Verringerung der Kerbspannung im Übergangsbereich zwischen Trommelmantel und Bordscheibe wird somit vermindert. Der Untersuchungsbedarf hinsichtlich der zuvor in Kapitel 2.3 dargestellten Reibungsverhältnisse im System Seil-Seiltrommel wird durch diese Betrachtung insoweit verdeutlicht, als dass die Reibkoeffizienten in den genannten Kontaktbereichen durchaus einen nennenswerten Einfluss auf die Quantität der Bordscheibenlasten aufweisen. Mitunter sind durch die genannten Effekte im Zuge der mehrlagigen Faserseilwicklung in den Übergangsbereichen zwischen Trommelmantel und Bordscheibe Kerbspannungsminimierungen von bis zu 40% zu verzeichnen. Trotz mitunter resultierender quantitativ höherer Lastbeiträge offenbart sich demnach in dieser Hinsicht Potential zur Ersparnis von Werkstoff als auch Bauraum.

Ähnliches gilt für das Beanspruchungsszenario des Trommelmantels: trotz quantitativ höherer Bauteilbeanspruchungen als in der Simulation vermutet, bieten sich durch eine in Abhängigkeit des verwendeten Faserseiles mögliche Beanspruchungsminimierung an diesem Teilsystem zusätzliche Potentiale hinsichtlich strukturellen sowie werkstofflichen Leichtbaus. Ebenfalls bieten sich durch eine mögliche Werkstoffsubstitution weitreichende Möglichkeiten sowie Notwendigkeiten zur funktionellen Gestaltung, unter anderem einer Funktionalisierung von Bauteiloberflächen.

Der Bedarf einer derartigen Oberflächengestaltung und -funktionalisierung wird insbesondere durch makroskopische Phänomene am Teilsystem Seil im Zuge der Mehrlagenwicklung deutlich: die zuvor beschriebenen Effekte, insbesondere in Verbindung mit einem für den jeweiligen Ovalisierungsgrad gänzlich ungeeigneten bzw. nicht vorhandenem Rillungssystem resultieren oft in Erscheinungen wie einem verstärkten Auftreten von Wickellücken, dem Überspringen von Wicklungen, extremen Wickelstörungen im Aufstiegsbereich, einem Verkleben des Seiles, einem Abgleiten des ovalisierten Seiles in darunter liegende Wickellücken, abrasiven Seilschäden durch einen Aufstieg des Seiles in die nächste Wickellage sowie kritischen Beanspruchungszuständen der Windentrommel durch Seilverklebung (**Abbildung 13**).



Abbildung 13: Zu beobachtende makroskopische Phänomene am Teilsystem Faserseil im Zuge der Mehrlagenwicklung

Das Einschneiden einzelner Wicklungen in darunter liegende Seillagen ist hierbei einerseits hinsichtlich des Seilverschleißes (Abrasion sowie Wärmeentwicklung), andererseits hinsichtlich eines plötzlich eintretenden, unkontrollierten Beanspruchungszustandes der eingesetzten Windentrommel als äußerst problematisch anzusehen.

Da die beschriebenen Phänomene ebenfalls bei hochfesten Faserseilen mit erhöhtem Seilquerelastizitätsmodul zu Tage treten, scheint es demnach weniger zu gelten, eine Seilkonstruktion bzw. Seilfaser mit hoher lateraler Steifigkeit zu identifizieren oder diese Eigenschaft fertigungstechnisch kostenintensiv einzustellen, sondern vielmehr die in den Kapiteln zuvor beschriebenen Kenngrößen zu berücksichtigen und hiermit die Trommelung des Zugmittels durch eine geeignete Gestaltung und Funktionalisierung von Trommelmantel sowie Bordscheibe zu unterstützen.

Durch die im Vergleich zu Stahlseilen geringere Längs- und Querelastizität und damit Formstabilität der Faserseile unter Last stellen sich wie gezeigt andersartige mechanische Belastungen an Trommelmantel sowie Bordscheiben ein. Die konstruktive Gestaltung der Trommel (Wandstärke der Trommel, Stärke der Bordscheiben, Ausgestaltung des Überganges Bordscheibe zu Trommel etc.) muss demnach hierfür in großen Teilen neu definiert sowie die Frage nach Werkstoff und Fertigungsverfahren erneut gestellt werden.

Eine vor dem Hintergrund des Strukturleichtbaus beanspruchungsgerecht umgestaltete Möglichkeit der Auskonstruktion zeigt beispielsweise **Abbildung 14**. Das Potential der Materialersparnis und weiterer mittelbarer Zielgrößen kann bereits in diesem frühen Entwicklungsstadium mit bis zu ca. 30 % veranschlagt werden. Bei der Trommelkonstruktion wurden die vorhandene konstruktiven Sicherheiten sowie funktionsrelevanten Anschlussmaße wie bspw. für Getriebe und/oder Lagerungen beibehalten, wobei an dieser Stelle ebenfalls ausdrücklich auf die Potentiale der möglichen Anwendung eines geringeren D/d-Verhältnisses im Zuge der Faserseilbewicklung und somit auf eine deutliche Bauraumminimierung hingewiesen sei.

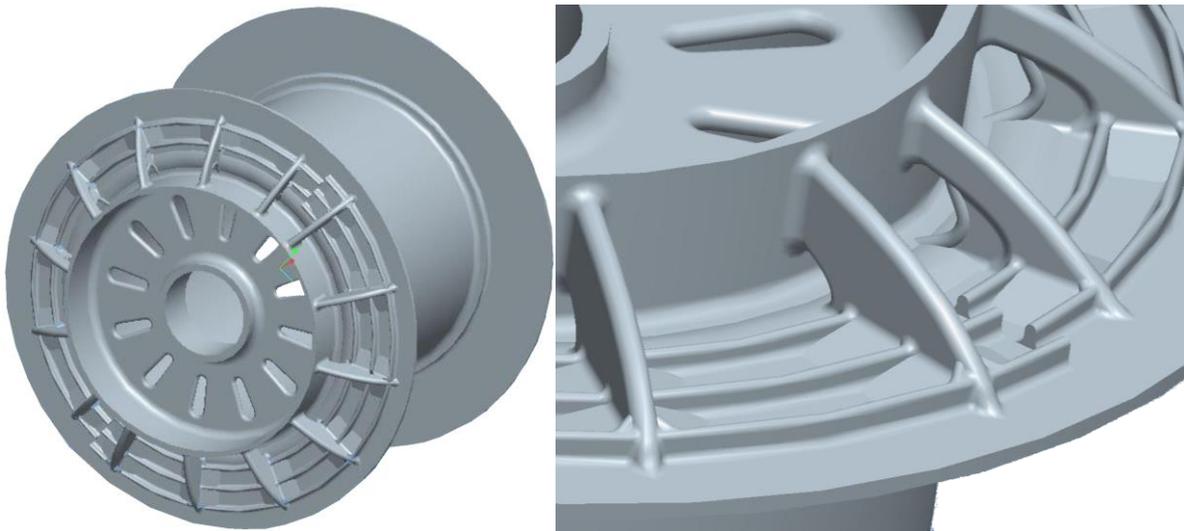


Abbildung 14: Für die Mehrlagenwicklung von moderner Faserseile vor dem Hintergrund des Strukturleichtbaus beanspruchungsgerecht umgestaltete Möglichkeit der Auskonstruktion einer Windentrommel

Weitere mögliche Ansatzpunkte zur funktions- und beanspruchungsgerechten Gestaltung unter Aspekten des Leichtbaus sind unter anderem in Teilbereichen des Rillungssystems hinsichtlich dessen konstruktiver Ausgestaltung sowie weitreichender Möglichkeiten der Oberflächenfunktionalisierung zu identifizieren. Die vor dem Hintergrund der in Kapitel 2.2 dargestellten grundlegenden Erkenntnisse zum Verformungsverhalten von Faserseilen, insbesondere deren Ovalisierung, können beispielsweise in Form einer entsprechenden Ausgestaltung der Rillenform sinnvoll genutzt werden. Diesbezügliche Bestrebungen sind bereits seitens mehrerer Kranhersteller zu verzeichnen.

Die in Kapitel 2.3 avisierten breiten und grundlegenden Untersuchungen zu den Reibungsverhältnissen im Kontakt Seil-Seiltrommel können dahin gehend genutzt werden, um eine für das Teilsystem Seil sowie das Teilsystem Seiltrommel bilateral sinnvolle Oberflächenfunktionalisierung zugunsten einerseits eines niedrigen Seilverschleißes sowie andererseits niedriger Seiltrommelbeanspruchungen zu identifizieren. Am Teilsystem Seiltrommel sind dabei neben der gegenwärtigen monolithischen Gestaltungsweise durchaus auch Ausgestaltungsformen in Mischbauweise vorstellbar, wenn nicht sogar zielführend.

4. Ausblick

Eine Änderung charakteristischer Seileigenschaften durch den Einsatz synthetischer Seile wie beispielsweise deren Biegesteifigkeit, Längs-/Querelastizität sowie Querverformung/Ovalisierung führen wie in dem vorliegenden Artikel dargestellt zu einer erheblichen Änderung der Belastungen im Seiltrieb und gleichzeitig zu neuen Schädigungsmechanismen, die eine andersartige Dimensionierung der Seiltriebelemente zur Folge haben müssen.

Es wurde gezeigt, dass durch die Erfassung zusätzlicher sowie die wiederholte Untersuchung bereits bekannter Einflussgrößen wesentliche Informationen zur Beschreibung des nach wie vor mit vielerlei Fragezeichen behafteten Faserseiles gewonnen und die derzeitige Lücke im kombiniert analytisch-numerischen Festigkeitsnachweis von Seiltrommeln vor dem Hintergrund der Faserseilbewicklung hinreichend geschlossen werden kann. Die Mehrlagenwicklung moderner Faserseile wird somit hinreichend mittels Werkzeugen der numerischen Simulation abbildbar.

Durch die Berücksichtigung realistischer Werte für die Seilquerelastizität, den Ovalisierungsgrad sowie der Reibungsverhältnisse in und zwischen den Teilsystemen Seil- und Seiltrommel wird eine sichere und treffende Dimensionierung des Teilsystems Seiltrommel für den Einsatz hochfester Faserseile möglich. Zusätzlich erschließen sich weitere Potentiale hinsichtlich der funktions- und beanspruchungsgerechten Gestaltung unter Aspekten des Leichtbaus durch Strukturleichtbau, Materialsubstitution sowie Funktionalisierung von Oberflächen, um das System Seil und Seiltrommel leistungsfähiger, effizienter und funktioneller zu gestalten. Gegenwärtig werden am Institut hierzu mehrere Ansätze in Forschung sowie industrieller Forschung verfolgt und umgesetzt.

Das Fehlen wissenschaftlich abgesicherter Erkenntnisse über die genannten Eigenschaften hochfester Faserseile ist nach wie vor ein wesentlicher Hinderungsgrund für die zügige Einführung neuer, marktreifer Produkte, welche die innovativen Potentiale hochfester Kunststoffseile in vollem Umfang nutzen. Das Institut für Maschinenwesen setzt es sich daher zum Ziel, die identifizierten Wissenslücken in Projekten der Grundlagenforschung zu schließen und die im Rahmen dieses Artikels genannten Potentiale bestmöglich in Forschung und Industrie umzusetzen.

Literatur

- [Bec69] Bechtloff, G. *Die Beanspruchung des Drahtseilquerschnittes unter Längslast und ebener Querpressung*; Draht - Welt, Nr. 55, 1969.
- [Die71] Dietz, P. *Ein Verfahren zur Berechnung ein- und mehrlagig bewickelter Seiltrommeln*; Dissertation, Technische Hochschule Darmstadt, Darmstadt, 1971.
- [Fey00] Feyrer, K. *Drahtseile - Bemessung, Betrieb, Sicherheit*, 2nd edition, Berlin: Springer-Verlag, 2000.
- [Gre11] Greenwood, M, Longerich, R. *New large diameter synthetic rope testing yields high strength and performance efficiencies*, OCEANS 2011 Conference, 19-22 Sept. 2011.
- [Hea04] Hearle, J. *High-performance fibres*, Cambridge: Woodhead Publishing, 2004.
- [Hei12] Heinze, T.; Lohrengel, A.; Stahr, K. *Dimensionierung von Seiltrieben - zum Verformungsverhalten von Faserseilen*; Hebezeuge Fördermittel - Fachzeitschrift für Technische Logistik, 7-8/2012; ISSN 0017-9442, August 2012.
- [Loh09] Lohrengel, A., Dietz, P., Schwarzer, T. and Wächter, M. *Problems related to the design of multi layer drums for synthetic and hybrid ropes*, Proceedings OIPEEC 2009 / 3rd International Ropedays, Stuttgart, 2009.
- [Loh11a] Lohrengel, A., Stahr, K. and Wächter, M. *Safe use of hoisting drums wound with multiple layers of wire, hybrid, fibre and/or large diameter ropes*, Proceedings OIPEEC 2011 / 4th International Ropedays, College Station, Texas, 2011.
- [Loh11b] Lohrengel, A., Stahr, K. and Wächter, M. *Sicherer Einsatz von Seiltrommeln bei mehrlagiger Bewicklung mit Kunststoffseilen und/oder Seilen großer Nenndurchmesser*; Technical Report Fakultät für Mathematik/Informatik und Maschinenbau der TU Clausthal; Dezember 2011, ISSN 1869-8018.
- [Loh13a] Lohrengel, A.; Stahr, K.; Wächter, M.: *Simulation of fibre ropes and their effects on the strain scenario of multilayer wound rope drums*; Simulating rope applications; Proceedings of the OIPEEC Conference 2013, Dr. I.M.L. Ridge, Oxfordshire, UK, ISBN: 978-0-9552500-4-0.
- [Loh13b] Lohrengel, A.; Stahr, K.; Wächter, M.: *Beanspruchungsgerechte Gestaltoptimierung von Windentrommeln bei mehrlagiger Bewicklung mit modernen Fasergeflechten*; 21. Internationale Kranfachtagung "Krane - Nachhaltigkeit in Entwicklung und Betrieb" (2013) S. 223-234, ISBN: 3-89194-205-2
- [Mic11] Michael, M. *Beitrag zur Treibfähigkeit von hochfesten synthetischen Faserseilen*, Dissertation, Technische Universität Chemnitz, 2011.
- [Mup01] Mupende, I. *Beanspruchungs- und Verformungsverhalten des Systems Trommelmantel - Bordscheiben bei mehrlagig bewickelten Seiltrommeln unter elastischem und plastischem Werkstoffverhalten*; Dissertation, Technische Universität Clausthal, Clausthal-Zellerfeld, 2001.
- [Ohe06] O'Hear, N., Grabandt, O., Hobbs, R. E. *Synthetic fibre ropes for mine winding*, Proceedings of the OIPEEC Conference, Athens, 2006.
- [Ohe12] O'Hear, N. *Advanced Rope Technology*, Tension Technology International Ltd., 2012.
- [Reb06] Rebel, G., Verreet, R. and Ridge, I.M.L. *Lightweight ropes for lifting applications*, Proceedings of the OIPEEC Conference, Athens, 2006.
- [Reb11] Rebel, G., Verreet, R., Schmitz, B. *Degradation mechanisms of wire ropes operating on multi-layer crane and min hoisting drums*, Proceedings OIPEEC 2011 / 4th International Ropedays, College Station, Texas, 2011.
- [Sch11] Schwarzer, T. *Gestaltung und Dimensionierung von Windentrommeln bei mehrlagiger Bewicklung mit Kunststoff- und Hybridseilen*, Dissertation, Technische Universität Clausthal, Clausthal-Zellerfeld, 2011.
- [Sch86] Schiffner, G. *Spannungen in laufenden Drahtseilen*, Dissertation, Universität Stuttgart, 1986.
- [Shi89] Shirong, G. *Research on the performance of the friction coefficient in a rope winder*, Mining Science and Technology, 1989.
- [Sta08] Standing, R. G., Jackson, G. E., Charles, N. *DISH and FRDS: Helping the Industry to Deploy Subsea Hardware in Ultra-Deep Water*, Marine Heavy Transport & Lift II, The Royal Institution of Naval Architects, London, 2008.

- [Sub12] Subsea 7 *Skandi Acergy* Vessel Datasheet, Subsea 7, Scotland (UK), 2012.
- [Ver98] Verreet, R. *Drahtseile - ein praxisbezogener Lehrgang* -; PR GmbH Werbe-agentur & Verlag, Aachen, 1998 (Wire Ropes - A Practical Course -; PR GmbH Werbeagentur & Verlag, Aachen, 1998.
- [Vog04] Vogel, W. *Neuartige Maschinenelemente in der Fördertechnik und Logistik - hochfeste laufende Faserseile*, Euroseil 123 (2004), S. 44-48 (New Machine Elements in Materials Handling and Logistics - High-Strength Running Fibre Ropes, Euroseil 123, 2004.
- [Wei05] Weiskopf, U. *Untersuchungen zur Lebensdauer von Kranhubseilen in der Mehrlagenwicklung*, Dissertation, Universität Stuttgart, 2005.