



TU Clausthal

Clausthal University of Technology

Sicherer Einsatz von Seiltrom- meln bei mehrlagiger Bewick- lung mit Kunststoffseilen und/ oder Seilen großer Durchmesser

A. Lohrengel, K. Stahr, M. Wächter

Technical Report Series

Fac3-11-03



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

Prof. Dr. Oliver Zirn

Sicherer Einsatz von Seiltrommeln bei mehrlagiger Bewicklung mit Kunststoffseilen und/oder Seilen großer Nenndurchmesser

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

Die in der Marine- und Offshore-Industrie stetig steigenden Anforderungen hinsichtlich Förderkapazität und -tiefe bedingen ebenso steigende Erfordernisse an Seile jedweder Machart (Draht- bzw. Faserseile). Eine Konsequenz dieser Anforderungen ist unter anderem der Einsatz kompakterer Drahtseile mit Nenndurchmessern von teilweise über 100 mm. Höher gewichtete Anforderungen bezüglich eines reduzierten Längengewichtes, Korrosionsbeständigkeit, Umweltschonung, Sicherheit, Ergonomie sowie Personenschutz befürworten hingegen wiederum den Einsatz hochmoderner Fasergeflechte.

Die aus den andersartigen Seileigenschaften erwachsenden Anforderungen und Einflüsse auf die eingesetzten Hebe- und Förderzeuge bei einer notwendigen mehrlagigen Bewicklung sind jedoch bis dato ungeklärt. Erfahrungen zeigen, dass zudem gegenwärtig unrealistische Lastannahmen bei der Auslegung und damit auch Absicherung bestehender Windenanlagen für den Schadensfall vorherrschen. Der sichere Einsatz der genannten Seiltypen in Kombination mit bestehenden Seiltrommelsystemen bedingt Kenntnis bezüglich des Einflusses der Seillängs- und -quersteifigkeiten auf die Trommelbeanspruchung sowie der sich über der Einsatzzeit verändernden Seileigenschaften.

Untersuchungen am Institut für Maschinenwesen zeigen signifikante Unterschiede bezüglich der genannten Einflussgrößen sowie deren Einfluss auf das resultierende Beanspruchungsszenario und Spulverhalten von Windentrommeln und deren Auswirkung auf bestehende Gestaltungs- und Berechnungsgrundlagen.

Dieser Artikel gibt einen zusammenfassenden Überblick der gegenwärtigen Forschungsaktivitäten zur Gestaltung und Dimensionierung von Windentrommeln sowie bedeutender Einflussgrößen hinsichtlich der Festigkeit bestehender Windenanlagen unter Berücksichtigung einer mehrlagigen Bewicklung mit Draht-, Hybrid- und Kunstfaserseilen. Des Weiteren wird ein Ausblick auf nach wie vor notwendige Schritte zur Anpassung der bestehenden Auslegungsmethoden gegeben.

Continuously rising requirements in marine and offshore technology on lifting capacity, depth and equipment reliability have led in turn to increasing demands on wire ropes, respectively fiber ropes. The use of wire ropes with compacted strands and of nominal diameters even above 100 mm is just one of the results of these requirements. The use of modern fiber structures is to be recommended in order to meet more important requirements as regards reduced weight per length, corrosion resistance, environmental protections, ergonomics and personal safety.

The requirements arising from these fundamentally different rope characteristics and their impact on lifting equipment when using multi-layer winding are so far unknown. Experience shows that unrealistic load assumptions are being made presently about dimensioning and thus also safeguarding of existing winding equipment in the event of damage. The safe application of above-mentioned types of rope in combination with existing rope-drum-systems demands knowledge of longitudinal and lateral rope-stiffness on the drum load and of the change in rope characteristics during the course of operation.

Initial research at Institute for Mechanical Engineering showed significant differences regarding these variables and remarkable aspects regarding the consequential loading-scenario and spooling behaviour of hoisting drums and their impact on existing calculation and dimensioning bases. This paper shall give a review on current research activities on designing and dimensioning winch drums as well as on impact aspects concerning the durability of existing winch drums for multi-layer winding with wire, hybrid and fiber ropes. Further it gives an outlook on further required steps for an adaption of existing dimensioning methods.]

1 Seil- und Seiltrommelforschung am IMW



Abbildung 1: Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. Peter Dietz

Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. Peter Dietz verunglückte am 7. April 2009 auf einer Dienstreise in Ecuador tödlich. Prof. Dietz wurde 1939 in Darmstadt geboren. Er studierte an der Technischen Universität Darmstadt und promovierte dort 1971 über die Berechnung von Seiltrommeln. Seit 1974 war Prof. Dietz in leitender Position für die Maschinenfabrik Pittler AG in Langen tätig, bevor er 1980 dem Ruf an die Technische Universität Clausthal folgte. Dort leitete er als Universitätsprofessor von Oktober 1980 bis Ende Januar 2007 das Institut für Maschinenwesen IMW und bekleidete für vier Jahre das Amt des Rektors der Hochschule. Vor und während seiner Zeit als Leiter des Instituts für Maschinenwesen der TU Clausthal definierte er unter anderem maßgeblich

die Grundlagen zur analytischen, numerischen und experimentellen Bestimmung des Betriebsverhaltens von mehrlagig bewickelten Seiltrommeln.

Die Beanspruchungsanalyse von Seiltrommeln gliedert sich primär in die Untersuchung von Mantel- sowie Bordscheibenbelastungen. Es existieren verschiedene Theorien und Überlegungen für deren analytische Bestimmung. Grundlegend zur Bestimmung des belastenden Wickeldrucks des Seilpaketes und der daraus resultierenden Beanspruchungen einer mehrlagig bewickelten Seiltrommel (unter Berücksichtigung der Mantelverformung sowie dem Einfluss des Längs- und Querelastizitätsmodul E_{SQ} des verwendeten Seiles) ist hierbei das von Dietz entwickelte Berechnungsverfahren [1] (Abbildung 2).

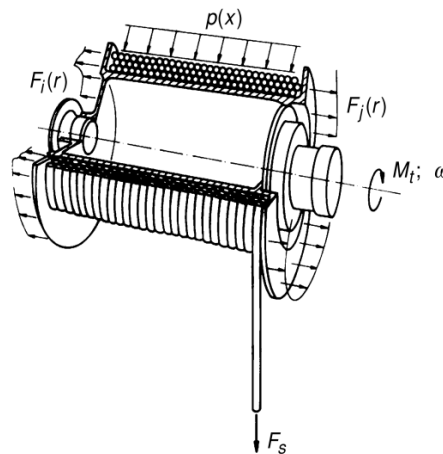


Abbildung 2: Belastungsmodell einer Seiltrommel [1]

Die Ermittlung des Drucks auf den Trommelmantel sowie die daraus entstehenden Beanspruchungen wurden erstmals in der Arbeit von Ernst [2] für eine einlagig bewickelte Trommel mit starrer Bordscheibe und starrer Einspannung des Mantels an der Bordscheibe behandelt. Dietz [1] erweiterte die Betrachtung grundlegend für den Fall der mehrlagig bewickelten Seiltrommel unter Berücksichtigung der Mantelverformung sowie Veränderung des Seilquerschnitts. Er zeigte, dass die Belastung auf den Trommelmantel neben der Seilzugkraft auch von der Seilsteifigkeit (Längs- sowie Querelastizitätsmodul) abhängig ist, wobei der Querelastizitätsmodul kein konstanter Wert im Verlauf des Wickelprozesses ist. Für die Vereinfachung des Berechnungsvorganges betrachtete er zunächst den Querelastizitätsmodul als konstant.

Die Berechnungsansätze nach Dietz [1] wurden von Henschel [3] erweitert: Das Seilquerelastizitätsmodul E_{SQ} wird nicht mehr als konstant betrachtet, sondern für die Druckberechnung um eine Lagenabhängigkeit erweitert. Dies ermöglicht bei der Seiltrommelauslegung eine Erhöhung der maximalen Seilzugkräfte um bis zu 20% gegenüber der Annahme eines konstanten Querelastizitätsmodul. Diese Berechnungsmethode führte zu einer besseren Beschreibung der Trommelbelastung und trägt zu einer günstigeren Dimensionierung der Trommel im Hinblick auf Leichtbau bei.

Für die Auslegung der Bordscheiben existieren ebenfalls verschiedene Berechnungsansätze, die Betrachtung der Bordscheiben erfolgt dabei jedoch losgelöst vom Trommelmantel. Dietz [1] entwickelte mit seiner „Theorie des Aufsteigens der letzten Windung an der Bordscheibe“ das bis heute allgemein gültige

Berechnungsverfahren zur Ermittlung der Axialkraft auf die Bordscheiben: Hierbei erzeugt der Aufstieg des Seiles von der Lage $m - 1$ in die Lage m durch die auftretende Reibung und den sich stetig verringernden Abstand zwischen vorangegangener Windung und Bordscheibe eine Axialkraft auf die Bordscheibe (**Abbildung 3**).

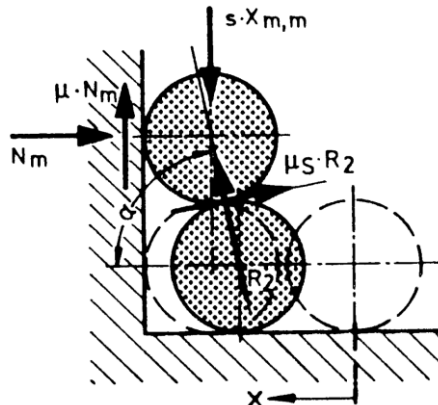


Abbildung 3: Aufsteigen der letzten Windung an der Bordscheibe [1]

Dietz [1] zeigte hierbei, dass der Aufstieg des Seiles bei der Verwendung einer schraubenförmigen Berillung (und die damit verbundene Entwicklung der Axialkraft auf die Bordscheiben) innerhalb eines Drehwinkels von 60° bis 120° stattfindet. Im Berechnungsmodell vereinfacht er die Winkelabhängigkeit der Axialkraft durch eine rotationsymmetrische Ersatzlast auf die Bordscheibe. Bei der Verwendung einer Seiltrommel mit der heute üblichen LEBUS®-Berillung kann der Aufstiegsbereich der Windung je nach Konstruktion zwischen 55° und 100° variieren. Mupende [4] entwickelte das Modell dahin gehend weiter, insofern er aus den Axialkraftkomponenten des Aufstiegs und des Parallelbereichs eine resultierende Axialkraft auf die Bordscheiben berechnet, um den Einfluss des Aufstiegs- und des Parallelbereichs bei der Entwicklung der Radialkraft auf die Bordscheibe zu berücksichtigen (**Abbildung 4**).

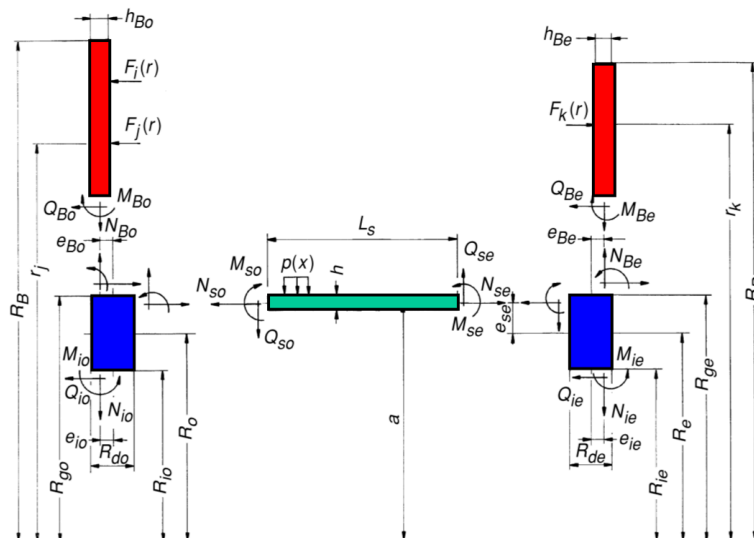


Abbildung 4: Gekoppeltes Belastungsmodell einer Seiltrommel [4]

Die beschriebenen Verfahren zur Berechnung der Mantel- und Bordscheibenbelastungen betrachteten bis dahin Mantel und Bordscheibe als zwei voneinander getrennte Systeme, das Zusammenspiel und damit die gegenseitige Beeinflussung bei auftretenden Belastungen wurde nicht berücksichtigt.

Um diese wechselseitigen Einflüsse bei der Auslegung einer Seiltrommel zu berücksichtigen entwickelte Mupende [4] ein Ersatzmodell, welches eine Kopplung der Mantel- mit der Bordscheibenbelastung ermöglicht. Das Ersatzmodell setzt sich zusammen aus zwei Platten zur Darstellung der Bordscheiben, einer Kreiszyklenschale zur Abbildung des Trommelmantels, zwei Kopplungsringen zur Anbindung der Bordscheiben an den Trommelmantel und zwei Stützscheiben, die die Anbindung an die Lager nachbilden. Die Berechnung der Bordscheibenbeanspruchungen erfolgt hierbei nach der Kirchhoff'schen Plattentheorie, die der Mantelbeanspruchungen nach der Theorie der biegesteifen, rotationsymmetrisch belasteten Kreiszyklenschale; [1], [5], [6]. Zur Lösung der entsprechenden Differentialgleichungen müssen bei beiden Theorien Randbedingungen angegeben werden, die die Steifigkeit der Übergangskopplung zwischen Mantel und Bordscheibe beschreiben.

Auf dieser Basis können die Beanspruchungen im Übergangsbereich vom Mantel auf die Bordscheibe (in Abhängigkeit von der Steifigkeit der Komponenten) genauer analysiert werden. Durch eine gezielte Parametervariation (wie z.B. der Anbindungsform – Schweißen, Schrauben oder Gießen), kann die Beanspruchung an der Verbindungsstelle minimiert werden. Weiterhin erweitert Mupende [4] die Betrachtung des „Gesamtsystems Seiltrommel“ für eine Auslegung der Seiltrommel im plastischen Bereich. Die bis dahin gängigen Berechnungsansätze basierten bis dahin ausschließlich auf einem linear-elastischen Materialverhalten. Im Betrieb weisen Seiltrommeln jedoch auch plastische Verformungen auf (beispielsweise an den Lagerstellen oder an den Bordscheibenübergängen). Sie treten trotz hoher Sicherheitsfaktoren ($\nu = 3$ für Mantel und Bordscheiben) und er daraus resultierenden Überdimensionierung der Einzelparameter aufgrund von ungünstigen Steifigkeitsverhältnissen des Gesamtsystems auf. Durch die bewusste Einbeziehung der plastischen Verformung ohne Funktionsbeeinträchtigung kann bei gleich bleibender Geometrie eine Laststeigerung um bis zu 10 % erzielt werden.

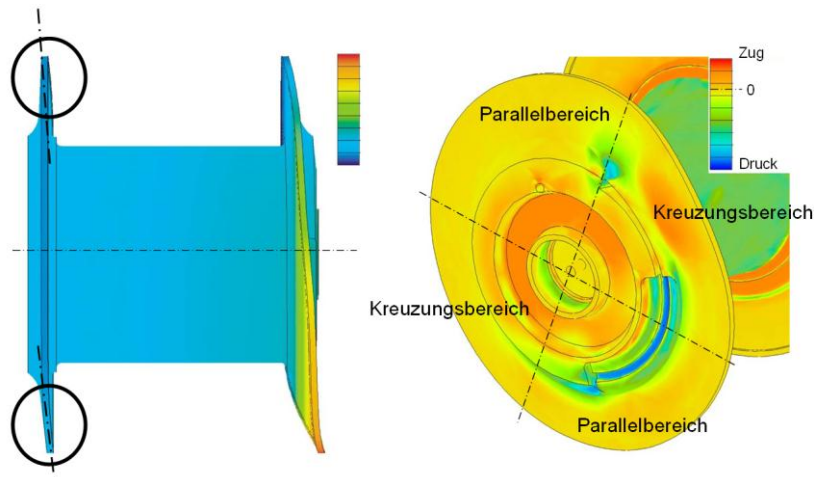


Abbildung 5: Finite Element Simulation einer unsymmetrisch belasteten Seiltrommel

Otto [7] entwickelte für die Ermittlung des Beanspruchungsverhaltens einer mehrlagig bewickelten Seiltrommel mit LEBUS®-Berillung ein nicht-rotationssymmetrisches Belastungsmodell (**Abbildung 5**). Die aus den beiden zuletzt genannten Arbeiten gewonnenen Erkenntnisse bezüglich der Unsymmetrie der Belastung auf den Trommelmantel ist entscheidend für die Analyse der Stabilität bei Seiltrommeln mit dünner Wandstärke oder mit sehr großen Mantelmittensradien.

Stand der Forschung am IMW bei der Auslegung mehrlagig bewickelter Seiltrommeln mit Drahtseilen



Abbildung 6: Geschichte der Seil- und Seiltrommelforschung am IMW der TU Clausthal

Abbildung 6 fasst die wesentlichen, im IMW erzielten Forschungsergebnisse in Bezug auf das System Seil und Seiltrommel seit den 1970er Jahren zusammen. Diese wurden durch die wissenschaftliche Arbeit von Dietz vorangetrieben. Die folgenden Kapitel sollen die laufenden und zukünftig erforderlichen Forschungstätigkeiten zur Konstruktion und Dimensionierung von Seiltrommeln bei mehrlagiger Bewicklung mit Hybrid- und Kunstfaserseilen sowie Seilen großer Nenndurchmesser aufzeigen.

2 Besonderheiten bei der Mehrlagenwicklung von Hybridseilen

Wie bereits auf OIPEEC 2009 [8] 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 am Institut für Maschinenwesen der TU Clausthal ist die Darstellung des Einflusses der geänderten Seileigenschaften von Hybrid- und Faserseilen auf die Trommelbeanspruchung mit Hilfe experimenteller, analytischer sowie numerischer Untersuchungen. Die folgenden Unterkapitel fassen die experimentellen Untersuchungen in punkto Hybridseile und die dahingehenden Forschungsergebnisse zusammen.

2.1 Experimentelle Bestimmung der Eigenschaften von Hybridseilen

Für unterschiedliche Seile, die dem Seilaufbau nach **Abbildung 8** entsprechen, werden Messungen der Längs- und Querelastizität durchgeführt [9]. Hierbei wurde neben der Querelastizität eines Einzelquerschnitts oder einer Säulenordnung mehrerer Seilquerschnitte ebenfalls die Querelastizität des in **Abbildung 7** dargestellten pyramidalen Seilpaketes ermittelt.

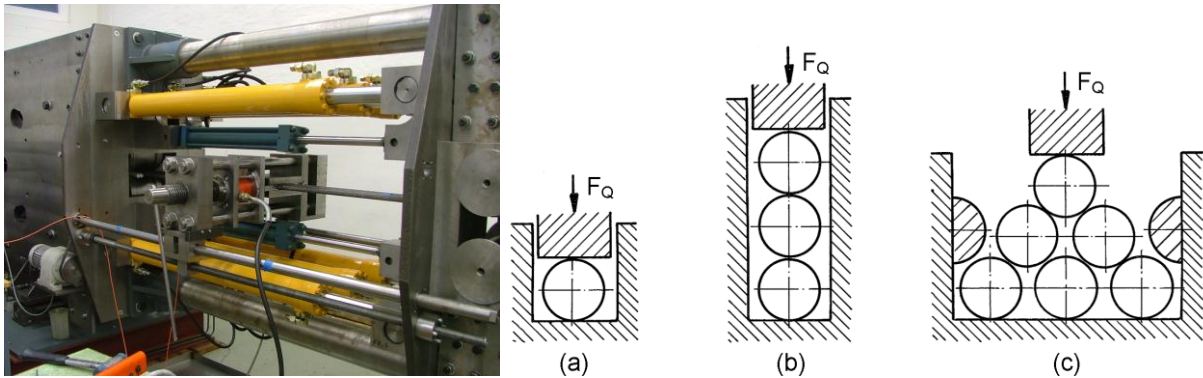


Abbildung 7: Prüfstand zur Bestimmung des Querelastizitätsmodules, Seilanordnung zur Bestimmung der Querelastizität a) Einzelquerschnitt, b) Säulenordnung, c) Pyramidenanordnung

Die Machart der untersuchten Draht- und Hybridseile ist eine weit verbreitete Konstruktion für Hubseile. Sie kombinieren eine gute Flexibilität aufgrund der acht Außenlitzen mit einer hohen Verschleißbeständigkeit durch die Kompaktierung dieser Litzen. Die Seile bestehen neben den acht Außenlitzen aus einem Seilkern, der unterschiedlich ausgestaltet ist. Im Folgenden wurde die Standardausführung des Seilkernes (Draht) durch das Fasermaterial zweier Hybridvarianten substituiert.

Material des Seilkernes	Querschnitt	Zugkraft [MPa]	Bruchdehnung [%]	E-Modul [GPa]	Dichte [g/cm ³]
Standardmoduliger Faserkern (SM)		3250	3.7	75	1.44
Hochmoduliger Faserkern (HM)		3100	2.7	105	1.45
Drahtkern		1770	2.6	200	7.85



Tabelle 1: Vergleich der Materialeigenschaften des Seilkernes, Darstellung des Seilquerschnittes [10]

Der Kernquerschnitt beläuft sich auf ungefähr 25 % des Seilgesamtquerschnittes. Die zwei untersuchten Hybridvarianten haben denselben Seilaufbau (CASAR Turboplast), aber Fasermaterialien unterschiedlicher Eigenschaft im Seilkern. Das verwendete Kernmaterial ist eine Aramidfaser mit verschiedenen mechanischen Eigenschaften. Die Fasern haben eine sehr hohe Zugfestigkeit verbunden mit einer niedrigen Dichte sowie niedrigen Dehnung. Die Eigenschaften der verwendeten Seilkonstruktionen sind in **Tabelle 1**

zusammengefasst. Der Hauptunterschied liegt hierbei im Elastizitätsmodul der verwendeten Kernmaterialien. Für ausführliche Informationen bezüglich der Seileigenschaften sei an dieser Stelle auf [10] verwiesen. In den Untersuchungen wurden zwei Seile, das PDD 1315 CZ und das CASAR Eurolift, mit einem Nenndurchmesser von 23 mm sowie einer Nennfestigkeit von 1960 N/mm^2 eingesetzt. Beim CASAR Eurolift handelt sich um ein drehungsfreies, flexibles Hubseil mit verdichteten Außenlitzen, verdichtetem Seilkern und intensiver Schmierung, welches im Gleichschlag „links“ ausgeführt ist. Durch die spezielle Konstruktion der Einlage wird eine Überkreuzung der Litzen vermieden, was die Gefahr von Beschädigungen im Seilinneren herabsetzt. Das Seil besitzt eine hohe Bruchkraft und bietet guten Widerstand gegen Pressung auf Seiltrommeln. Bei einem Durchmesser von 23 mm und einer Drahtnennfestigkeit von 1960 N/mm^2 beträgt die Mindestbruchkraft des verwendeten Seiles 471.8 kN bzw. 48.14 t. **Abbildung 8** zeigt exemplarisch den Querschnitt der Drahtseilkonstruktion.

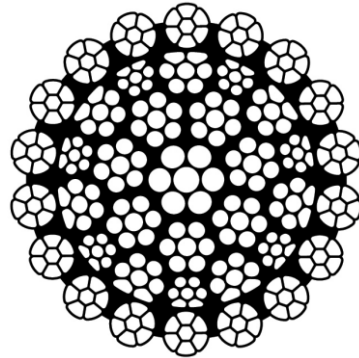


Abbildung 8: Querschnitt des Seiles CASAR Eurolift

Der Seilquerelelastizitätsmodul E_{SQ} 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. Darüber hinaus hat die Anzahl der im Versuch untersuchten Seillagen Einfluss auf den Seilquerelelastizitätsmodul. **Abbildung 9** zeigt den Seilquerelelastizitätsmodul E_{SQ} in Abhängigkeit des Längskraftverhältnisses k_L sowie der Anzahl der Seillagen bei einem Querkraftverhältnis von $k_Q = 0.07$.

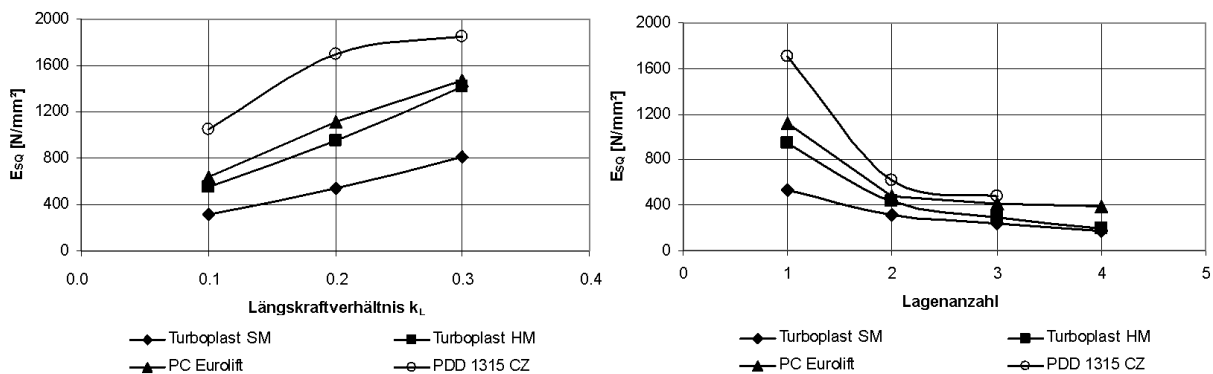


Abbildung 9: E_{SQ} in Abh. von k_L ; $k_Q = 0.07$ für eine Seillage sowie in Abh. der Lagenzahl für $k_L=0.2$; $k_Q = 0.07$

Im Versuch zeigt sich eine Zunahme des Querelelastizitätsmodules mit einer Steigerung der Längskraft für alle untersuchten Seile. Das Hybridseil mit standardmoduligem Faserkern (SM) weist hierbei den niedrigsten Wert auf. Der Querelelastizitätsmodul des Seiles mit hochmoduligem Faserkern (HM) ist in allen Messpunkten circa um den Faktor 1.5 höher als der der standardmoduligen Hybridvariante. Von großer Bedeutung ist die Tatsache, dass das Hybridseil mit hochmoduligem Faserkern den Querelelastizitäten des Seiles PC Eurolift entspricht ($k_Q = 0.07$). Das PDD 1315 CZ weist hierbei eine deutlich höhere Quersteifigkeit als das PC Eurolift auf. Allgemein kann eine Abnahme der Quersteifigkeit mit einer Zunahme der Seillagen festgestellt werden. Grundsätzlich entsprechen die in [9] für Hybrid- als auch Drahtseile ermittelten Werte einem sowohl in [3] als auch [4] genannten Wertebereich.

2.2 Die Versuchstrommel

Zur Verifizierung des Einflusses der geänderten Seileigenschaften auf die bei der Bewicklung entstehenden Trommelbeanspruchungen bei Verwendung der beschriebenen Hybridseile wurden an einer mit Dehnungsmessstreifen beklebten Windentrommel Wickelversuche durchgeführt. Mittels der applizierten Messstellen konnten die real auftretenden Beanspruchungen während einer fünfmaligen Bewicklung der Trommel experimentell ermittelt und ausgewertet werden.

Für diesen Versuch wurde eine als Gusskonstruktion (GGG 60) ausgeführte Hubwindentrommel verwendet, bei der die Bordscheiben fest an den Trommelmantel angebunden sind. Zur Führung der Seillagen wurde die

Mantelfläche der Trommel mit einer LEBUS®-Berillung versehen. Die beiden Aufstiegsbereiche verlaufen jeweils über 55° des Trommelumfangs, die anschließenden Parallelbereiche erstrecken sich über jeweils 125° des Trommelumfangs. Der Manteldurchmesser beträgt 480 mm bei ca. 1000 mm Länge sowie einem Bordscheibendurchmesser von 746 mm. Die gesamte Trommelkonstruktion ist für die Bewicklung mit einem Seil von 23 mm Durchmesser ausgelegt. Durch die Höhe der Bordscheiben ist eine mehrlagige Bewicklung der Trommel bis maximal 5 Seillagen möglich, wobei in jeder Lage aufgrund der Länge des Mantels und der Berillungsgeometrie 41 Windungen aufgespult werden können. **Abbildung 10** zeigt die in den Aufnahmerahmen des Seiltrommelprüfstands adaptierte Hubwindentrommel.

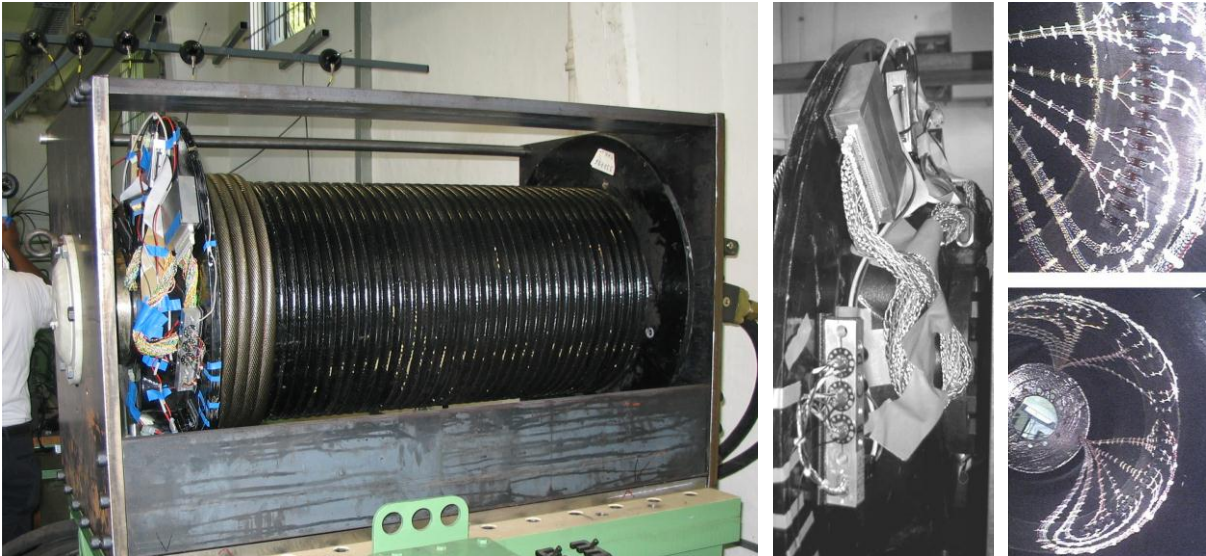


Abbildung 10: Windentrommel in Prüfstand, Telemetrieanlage, applizierte DMS im Inneren der Trommel

Zur Erfassung der durch den Wicklungsvorgang entstehenden Beanspruchung der Seiltrommel wurden am inneren Trommelumfang 32 gestapelte T-Rosetten appliziert: Bei diesen speziellen DMS messen zwei senkrecht zueinander stehende Messgitter die an dieser Position auftretenden Dehnungen in den entsprechenden Richtungen. Die Dehnungsmessstreifen sind in der Mitte des Trommelmantels und über den Umfang um jeweils 5° versetzt angeordnet. Diese Verteilung ist so gewählt, dass sowohl die auftretenden axialen als auch tangentialen Spannungen in einem Aufstiegs- und in einem Parallelbereich der Berillung gemessen werden können. **Abbildung 11** zeigt die Positionen der 32 gestapelten T-Rosetten (also 64 Einzelmessgitter) auf dem abgewickelten Trommelumfang.

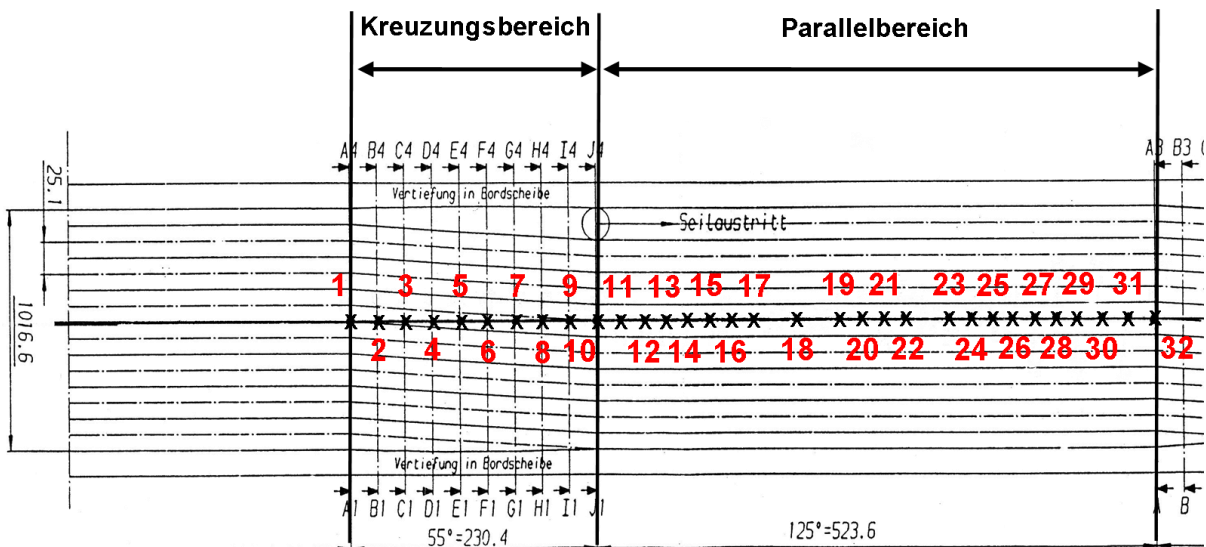


Abbildung 11: Positionen der 32 gestapelten T-DMS auf dem Trommelumfang

Zusätzlich zu den aufgenommenen Dehnungswerten wurden ebenfalls Seilzugkraft sowie Seilgeschwindigkeit über eine Datenleitung vom Prüfstand an den Messwerterfassungsrechner übermittelt. Die Messung der Seilzugkraft erfolgt über eine Kraftmessdose an der Umlenkrolle des Prüfstands, die Messung der Seilgeschwindigkeit erfolgt über einen Geschwindigkeitsaufnehmer in der Nähe der Treibscheibenwinde.

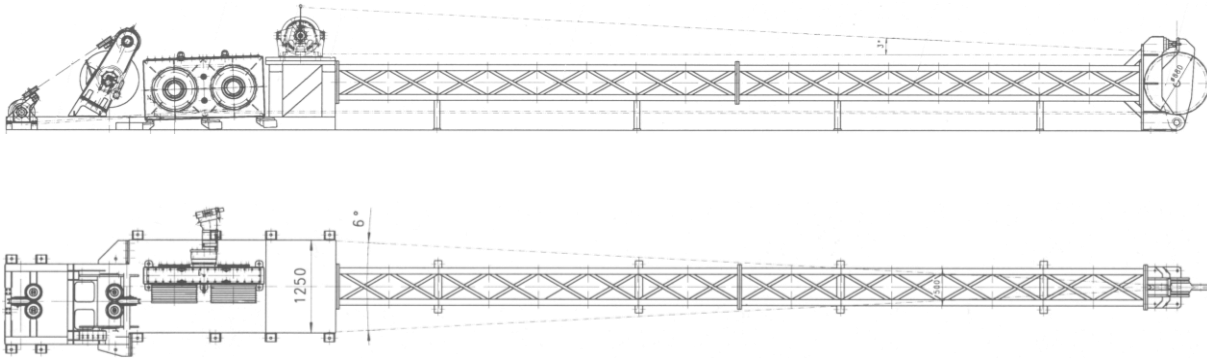


Abbildung 12: CAD-Darstellung des Windentrommelprüfstandes in Seitenansicht und Draufsicht

2.3 Experimentelle Analyse der im Zuge der mehrlagigen Bewicklung auftretenden Seiltrommelbeanspruchungen

Zur Verifizierung des Einflusses der Seileigenschaften auf die bei der Bewicklung entstehenden Trommelbeanspruchungen bei Verwendung von Hybridseilen wurden am zuvor beschriebenen Versuchsaufbau für beide Varianten der hybriden Seilkonstruktion (mit standardmoduligem sowie hochmoduligem Faserkern) als auch für das Seil CASAR Eurolift Spulversuche durchgeführt.

Die aufgenommenen Dehnungswerte der Dehnungsmessstreifen entsprechen denen an in **Abbildung 11** deklarierten Positionen auftretenden tangentialen und axialen Dehnungen der Seiltrommel. Für die Beanspruchungsanalyse der Seiltrommel müssen in Abhängigkeit davon die Tangentialspannung σ_T sowie die Axialspannung σ_A formuliert werden, welche durch die Belastung entstehen:

$$\sigma_T = \frac{E}{1-\nu^2} (\epsilon_T + \nu \cdot \epsilon_A) \quad \text{Gl. [1]}$$

$$\sigma_A = \frac{E}{1-\nu^2} (\epsilon_A + \nu \cdot \epsilon_T) \quad \text{Gl. [2]}$$

Bei der verwendeten Prüftrommel handelt es sich um eine gegossene Trommel aus GGG 60. Dieser globulare Grauguss besitzt einen E-Modul von 170000 N/mm^2 , die Querkontraktionszahl beträgt $\nu = 0.25$. Mit diesen Materialkennwerten und den aufgenommenen Dehnungen erfolgt mit Hilfe der Gl. [1] und Gl. [2] die Berechnung der während des Prüfbetriebs auftretenden Spannungen an allen Messpositionen.

Die im Folgenden dargestellten Abbildungen zeigen im Allgemeinen, dass mit zunehmender Versuchsdauer eine Erhöhung der Beanspruchung durch die einzelnen Seillagen erfolgt. Bei der auftretenden Tangentialspannung handelt es sich um eine Druckbeanspruchung und bei der Axialspannung um eine Zugbeanspruchung infolge der Durchbiegung des Trommelmantels an der jeweiligen Messposition. Es ist festzustellen (vgl. Abbildung 13), dass die Höhe der Belastungssteigerung bei konstanter Zugkraft mit zunehmender Lagenzahl infolge verschiedener Entlastungseffekte zurückgeht.

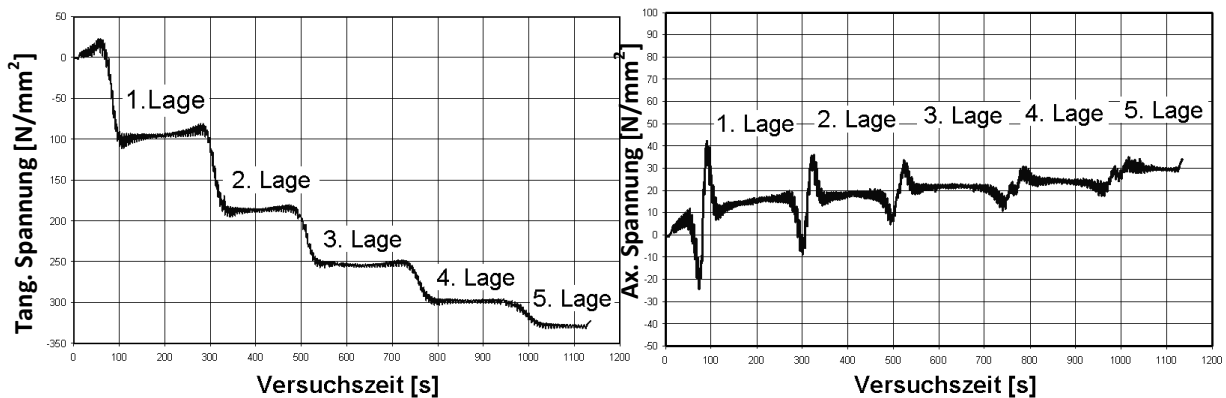


Abbildung 13: Verlauf der tangentialen sowie axialen Spannungen im Zuge der mehrlagigen Bewicklung

Die nachfolgenden Abbildungen zeigen den Tangential- sowie Axialspannungsverlauf über einen Aufstiegs- und einen Parallelbereich der LEBUS®-Berillung im Zuge einer Vollbewicklung mit fünf Lagen. **Abbildung 14** zeigt den Tangential- sowie Axialspannungsverlauf für alle 5 Seillagen über beide Bereiche der Trommelberillung zunächst für das Seil CASAR Eurolift für eine Seilzugkraft von $F_S = 50$ kN. **Abbildung 15** bzw. **16** zeigen die Spannungsverläufe für das Hybridseil mit hoch- bzw. standardmoduligem Faserkern.

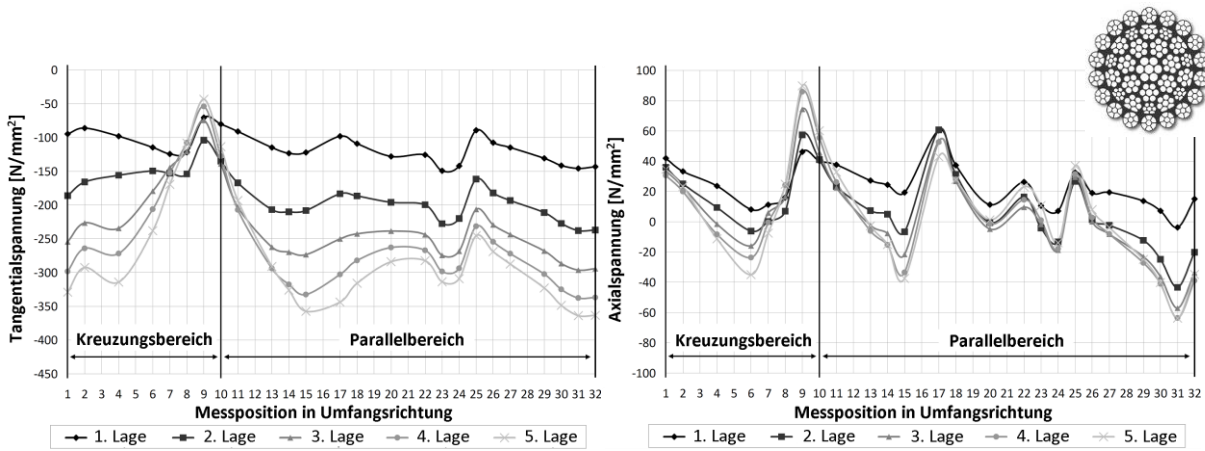


Abbildung 14: Tangential- sowie Axialspannung am Trommelmantel, Eurolift, $F_S = 50$ kN

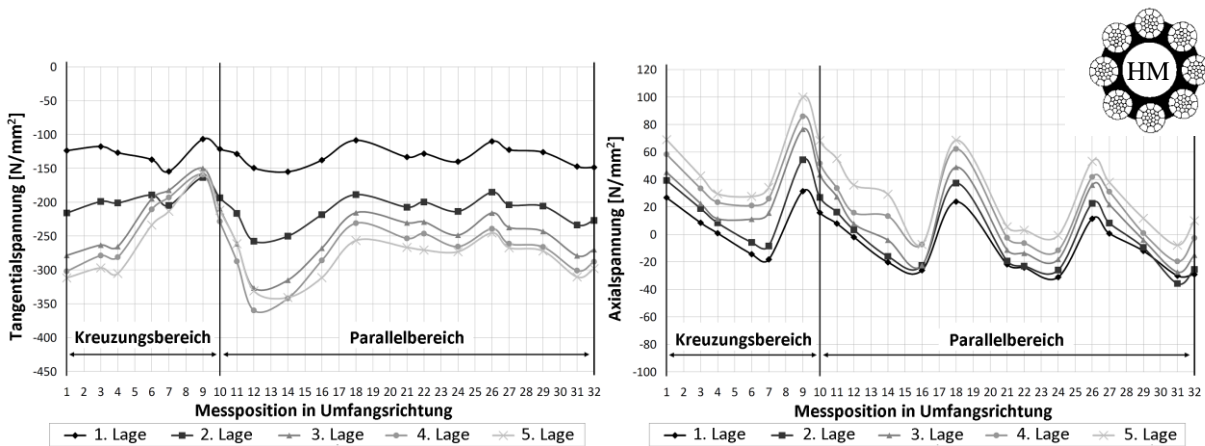


Abbildung 15: Tangential- sowie Axialspannung am Trommelmantel, Turboplast HM, $F_S = 50$ kN

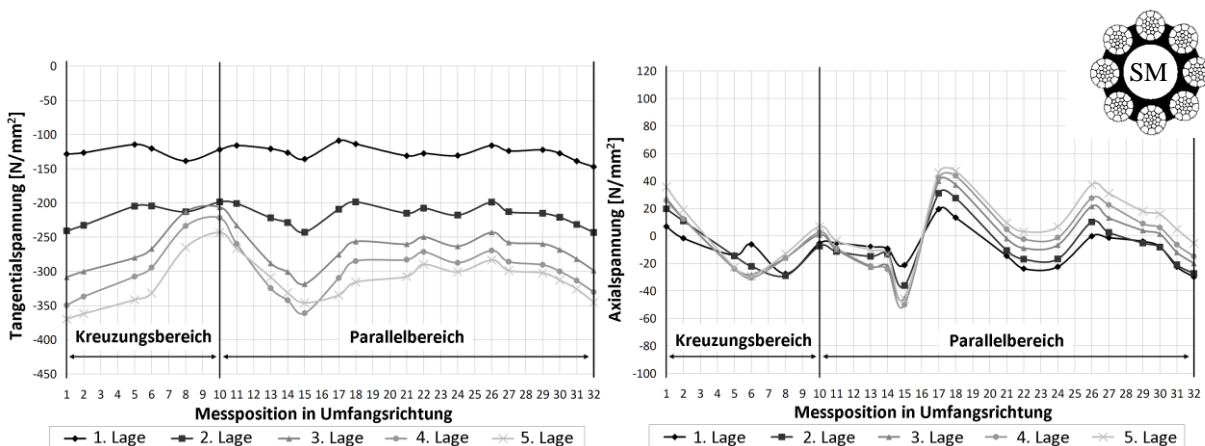


Abbildung 16: Tangential- sowie Axialspannung am Trommelmantel, Turboplast SM, $F_S = 50$ kN

Die unterschiedliche Höhe der Belastungssteigerung mit zunehmender Lagenzahl ist beim Tangential- wie auch Axialspannungsverlauf gut zu erkennen. Beträgt die Belastungssteigerung im Parallelbereich zwischen der ersten und der zweiten Lage beim Eurolift-Seil im Schnitt ca. 60 %, so verringert sie sich von der vierten auf die fünfte Lage auf nur noch ca. 7 %. Weiterhin ist eine zunehmende Unsymmetrie im Übergangsbereich

von Aufstiegs- zu Parallelbereich der LEBUS®-Berillung ab der zweiten Seillage zu erkennen. So kommt es zum Ende des Aufstiegsbereichs zu einem Tangentialspannungsmaximum und zum Anfang des Parallelbereichs zu einem lokalen Minimum des Tangentialspannungsverlaufs. Bei Vollbewicklung mit 5 Lagen führt diese Unsymmetrie im Parallelbereich zu einer Tangentialspannungsüberhöhung, im Vergleich zu den Werten in der Mitte des Bereichs, von ca. 29 %. Im Verlauf des Aufstiegsbereichs kommt es infolge der Vollbewicklung zwischen Messposition 1 und 9 sogar zu einer Absenkung der tangentialen Druckbeanspruchung um ca. 87 %. Bei der Darstellung der Axialspannung in **Abbildung 14-16** wird die Axialspannung zu dem Zeitpunkt genommen, in dem sich die unter Zugkraft stehende Seilwindung gerade direkt an der Messstelle befindet. **Abbildung 17** stellt diesen ersten Zeitpunkt schematisch dar:

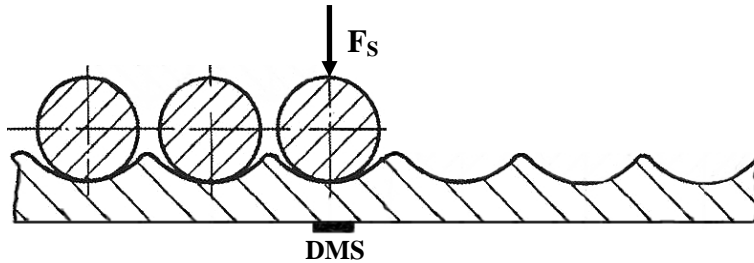


Abbildung 17: Belastungssituation an der Messstelle zum Zeitpunkt des Seilüberlaufes

In den Darstellungen des Axialspannungsverlaufs (vergl. **Abbildung 14-16**) ist die Unsymmetrie der Belastung beim Übergang von Aufstiegs- in den Parallelbereich zu erkennen: Am Ende des Aufstiegsbereichs tritt ein lokales Axialspannungsmaximum als Zugspannung auf, zu Beginn des Parallelbereichs ändert sich dann die Richtung der Axialspannung und bildet dort als Druckbeanspruchung ein lokales Minimum aus. Generell lässt sich unter der Annahme einer konstanten Wandstärke des Trommelmantels, die unsymmetrische Belastung der Seiltrommel auf unterschiedliche Drücke in den beiden Berillungsbereichen zurückführen. Die durch den Seilzug entstehenden Drücke sind im wesentlichen abhängig vom Wickelradius der jeweiligen Seillage:

$$p_x = \frac{F_s}{r_x \cdot d_s} \quad \text{Gl. [3]}$$

, wobei:

- p_x = Druck der Seillage x [N/mm²],
- F_s = Seilzugkraft [N],
- r_x = Wickelradius der Seillage [mm],
- d_s = Seildurchmesser [mm].

Wird der Wickelvorgang betrachtet, kreuzen sich die Windungen in den Aufstiegsbereichen einer LEBUS®-Berillung, deshalb liegen die Windungen nicht „auf Lücke“ zwischen den Seilen der unteren Lage, sondern direkt übereinander. **Abbildung 18** zeigt die Unterschiede zwischen den resultierenden Wickelradien im Aufstiegs- und Parallelbereich.

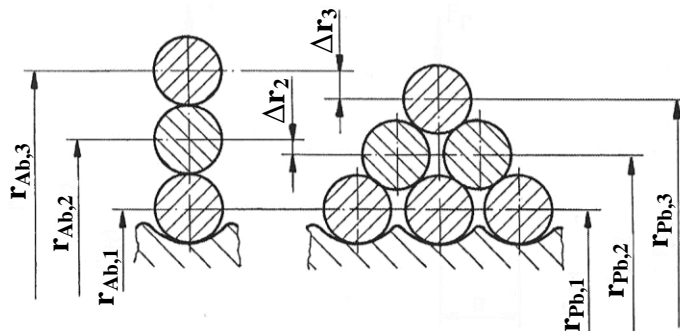


Abbildung 18: Unterschied der Wickelradien zwischen Aufstiegsbereich (Ab) u. Parallelbereich (Pb)

Da der Seillagendruck umgekehrt proportional zum Wickelradius ist, entsteht durch den größeren Wickelradius der zweiten Lage im Aufstiegsbereich ein geringerer Druck als im Parallelbereich. Der Einfluss des Wickelradius auf die Unsymmetrie der Belastung ist bei der ersten Lage der Tangentialspannung (**Abbildung 14**) zu erkennen. Dort besitzen Aufstiegs- und Parallelbereich den gleichen Wickelradius, was eine nahezu symmetrische Belastung der Bereiche zur Folge hat.

Generell lässt sich bis dato feststellen, dass der Einsatz einer hybriden Seilkonstruktion eine Vergleichmäßigung der Beanspruchungen des Trommelmantels zur Folge hat. **Abbildung 14-16** zeigen zwar keine merkliche Verringerung der Maximalspannungen im Trommelmantel, jedoch fallen die Spannungsgradienten im Zuge der mit der Lagenanzahl zunehmenden Unsymmetrie im Übergangsbereich von Aufstieg- zu Parallelbereich deutlich geringer aus. Die zuvor beschriebenen Tangentialspannungsüberhöhungen gegenüber den Bereichsmittelwerten im Zuge einer Vollbewicklung der Trommel mit 5 Lagen sind ebenfalls merklich geringer. Grundlegend wirkt sich ein verringerter Spannungsgradient im Beanspruchungsszenario des Trommelmantels positiv aus.

Die im Zuge der Bewicklung mit einem reinen Drahtseil angesprochene Unsymmetrie der Axialspannung beim Übergang von Aufstiegs- in den Parallelbereich fällt beim Einsatz eines Hybridseiles in Abhängigkeit der Eigenschaften des Faserkerns mehr oder minder geringer aus. Das lokale Axialspannungsmaximum (Zugspannung) verschiebt sich vom Ende zum Beginn des Aufstiegsbereiches, das lokale Axialspannungsmaximum (Druckspannung) im Parallelbereich verringert sich merklich.

Generell sind bei der Auswertung der experimentellen Ergebnisse die quantitativen Unterschiede von Tangential- und Axialspannungen zu beachten, demnach hat der beschriebene Tangentialanteil bei einer etwaig bestimmten Vergleichsspannung selbstverständlich den weitaus größeren Einfluss. Es ist zu erwarten, dass die im Zuge der Bewicklung mit einer hybriden Seilkonstruktion beobachteten Phänomene bei einer Bewicklung mit einem Zugmittel aus Kunstfasern wesentlich deutlicher hervor treten werden (vgl. Kapitel 4). Insbesondere die Änderungen der Axialspannungscharakteristika machen für den Fall der mehrlagigen Faserseilbewicklung wie ebenfalls der Bewicklung mit einem Hybridseil eine experimentelle Beanspruchungsermittlung an den Bordscheiben der Windentrommel notwendig.

3 Offshore-Einsatz von Drahtseilen großer Nenndurchmesser

Die in der Marine- und Offshore-Industrie stetig steigenden Anforderungen hinsichtlich Förderkapazität und -tiefe bedingen ebenso steigende Erfordernisse an Seile jedweder Machart (Draht- bzw. Faserseile). Eine Konsequenz dieser Anforderungen ist unter anderem der Einsatz kompakterter Drahtseile mit Nenndurchmessern von teilweise über 100 mm. Die aus den andersartigen Seileigenschaften erwachsenden Anforderungen und Einflüsse auf die eingesetzten Hebe- und Förderzeuge bei einer notwendigen mehrlagigen Bewicklung sind jedoch bis dato ungeklärt. Erfahrungen zeigen, dass zudem gegenwärtig unrealistische Lastannahmen bei der Auslegung und damit auch Absicherung bestehender Windenanlagen für den Schadensfall vorherrschen. Der sichere Einsatz der genannten Seiltypen in Kombination mit bestehenden Seiltrommelssystemen bedingt Kenntnis bezüglich des Einflusses der Seillängs- und -quersteifigkeiten auf die Trommelbeanspruchung sowie der sich über der Einsatzzeit verändernden Seileigenschaften.

Der in Kapitel 2.1 beschriebene stationäre Seilprüfstand am Institut für Maschinenwesen (**Abbildung 7**) erlaubt lediglich Quersteifigkeitsuntersuchungen an Seilen mit einem Seildurchmesser von 7 mm bis 32 mm. Die Zugkraft in Längsrichtung ist auf maximal 1200 kN und die Prüfkraft in Querrichtung auf maximal 500 kN begrenzt. Im Offshore-Bereich kommen jedoch vermehrt Seile mit Nenndurchmessern von 80 mm und mehr zum Einsatz. Die Seilhersteller machen sich bei höheren Nenndurchmessern die Vorteile modifizierter Seilkonstruktionen zu Nutze, eine simple Größenskalierung des Seilaufbaus findet hierbei nicht statt. Der Einfluss der charakteristischen Seilparameter - dem Längselastizitätsmodul E_{SL} sowie dem Querelastizitätsmodul E_{SQ} - auf den Beanspruchungszustand der Seiltrommel wies Dietz [1] bereits vor nunmehr 40 Jahren nach. Diese "Materialkonstanten" müssen gemessen werden. Sie definieren sich über den metallischen Querschnitt des Seiles, der Elastizitätsmodul in der Längsrichtung bestimmt sich hierbei zu:

$$E_s = \frac{\sigma_L}{\varepsilon_L} = \frac{F_s \cdot s}{\Delta l} \left[\frac{N}{mm^2} \right] \quad \text{with} \quad s = \sqrt{A_{\text{metallic}}} = \frac{d_s}{2} \cdot \sqrt{\pi q} \quad \text{Gl. [4]}$$

, sowie das Elastizitätsmodul in Querrichtung:

$$E_{SQ} = \frac{\sigma_Q}{\varepsilon_Q} = \frac{F_q \cdot l_{\text{meas}}}{s \cdot (d - d_1)} \left[\frac{N}{mm^2} \right] \quad \text{Gl. [5]}$$

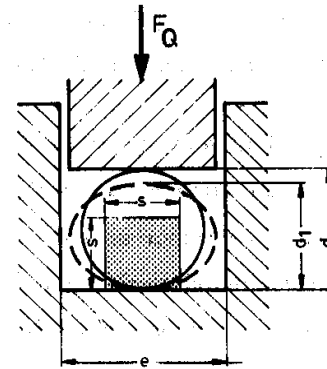


Abbildung 18: Zusammenhang sowie Bestimmung des Querelastizitätsmodules

, wobei: F_s = Seilkraft; s = Seitenlänge des metallischen Ersatzquerschnitts, F_q = Querkraft, $d_s = d$ = Seilnenndurchmesser, d_1 = verformter Seildurchmesser, q = Füllfaktor, l_{meas} = Stempelbreite.

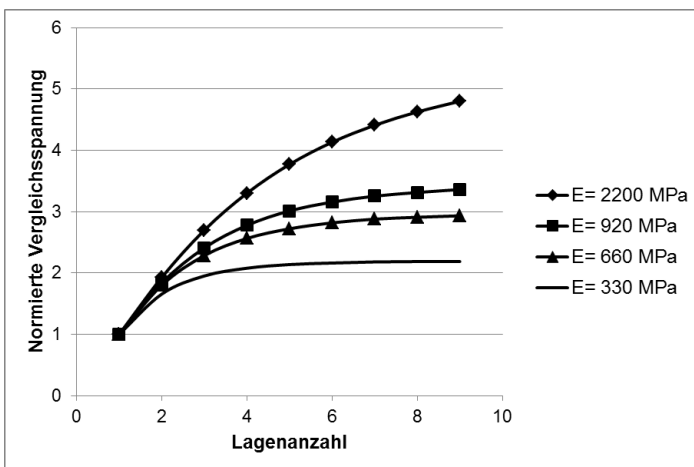


Abbildung 19: Berechnung der Trommelbeanspruchung für unterschiedliche Seilquerelastizitätsmodule E_{SQ} bei mehrlagiger Bewicklung (symmetrische Berechnung)

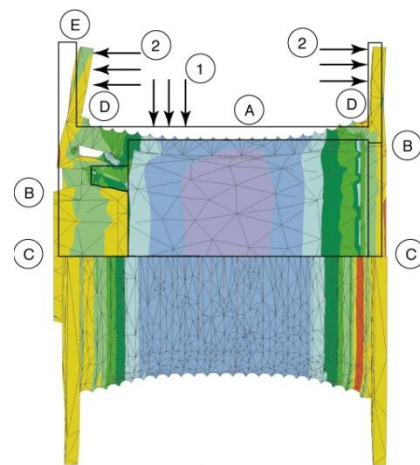


Abbildung 20: FE-Simulation einer Trommel unter Last, symmetrische Lastannahme

In **Abbildung 19** ist zu sehen, dass beispielsweise bei einem Querelastizitätsmodul von $E_{SQ} = 2200 \text{ N/mm}^2$ eine mit 10 Seillagen bewickelte Windentrommel um den Faktor 5 höher beansprucht wird als eine einlagig bewickelte Trommel und um den Faktor 3 höher bei einem Seilquerelastizitätsmodul von $E_{SQ} = 660 \text{ N/mm}^2$. Dieses Beispiel zeigt deutlich, dass im Zuge der Dimensionierung einer Seiltrommel unter Berücksichtigung des so genannten und seit Kurzem oft diskutierten DNV-Faktors für mehrlagige Bewicklung nicht das tatsächliche Lastszenario veranschlagt wird [11], [12]. Die Vernachlässigung des mechanischen Systems innerhalb des Seilpaketes führt hierbei zu einer Fehldimensionierung der Windentrommel für eine Bewicklung mit mehr als 3 Seillagen.

Berücksichtigt man ebenfalls die in Kap. 2.3, **Abbildung 14** dokumentierten Ergebnisse der experimentellen Beanspruchungsanalyse, kommt man zu dem Schluss, dass selbst für eine vergleichsweise moderate Seilquersteifigkeit des Eurolift-Seiles im Bereich $1000 - 1400 \text{ N/mm}^2$ der in „DNV's Standard for Certification No.2.22 Lifting Appliances“ proklamierte „Safety factor“ von neuerdings 3 oder gar zu einem früheren Zeitpunkt 1.75 für LEBUS®-berillte Trommeln bei mehr als 5 Lagen das reale Beanspruchungsszenario der Seiltrommel nicht widerspiegelt. Die Autoren des Artikels stimmen mit Anwendern wie auch Herstellern in der Hinsicht überein, dass die bisherige Herangehensweise in den Abnahmevorschriften der Versicherer zu stark vereinfacht ist und einer wissenschaftlichen Grundlage entbehrt, die Seil und Seiltrommel als Gesamtsystem betrachtet. Die Quersteifigkeit des Seiles bzw. des Seilpaketes ist als wesentliche Einflussgröße auf das Beanspruchungsszenario der Seiltrommel zu nennen. Der Einsatz eines in Querrichtung steiferen Seiles mit einem Quermodul von möglicherweise über 2000 N/mm^2 führt, konform **Abbildung 19**, zu einem dramatischen Beanspruchungszustand im Trommelmantel. **Abbildung 20** zeigt die Verformungen einer Seiltrommel bei symmetrischem Trommelaufbau und unter symmetrischer Belastung. Es sind Deformationen in radialer Richtung erkennbar, die die Dehngrenze überschreiten können. Diese Deformationen können z.B. das Getriebe eines hydraulischen Antriebs beschädigen, die Durchbiegungen an den Stützscheiben können zu Schädigungen an den Lagern führen und die Deformation der Bordscheiben wird das Spulverhalten beeinflussen. Außerdem führen hohe axiale Formänderungen dazu, dass die Bordscheiben nicht als Bremseinrichtung eingesetzt werden können.

Aussagen zum Elastizitätsverhalten - insbesondere in Querrichtung - bei Seilen höherer Größenordnung sind demnach zwingend erforderlich, liegen jedoch nur sehr selten vor. Die sich konstruktionsbedingt einstellenden andersartigen Seileigenschaften bedingen einen erhöhten Untersuchungsbedarf, insbesondere bezüglich der Bestimmung der Seilelastizität. Schadensfälle an Trommeln zeigen zudem, dass gegenwärtige, industriell vorgegebene Auslegungsvorschriften nur eine ungenügende Auslegungshilfe zur Nutzung dieser Seiltypen auf bestehenden Windenanlagen darstellen.

Für den Fall der Bewicklung einer LEBUS®-berillten Windentrommel mit fünf oder mehr Seillagen – ein häufiges Anwendungsszenario in Offshore-Anwendungen – wurde der seitens DNV proklamierte „Safety Factor“ von 1.75 auf mittlerweile 3 erhöht, was beispielsweise Hochseekräne und andere Hebezeuge effektiv auf 58% ihrer Nutzlast begrenzt. Die überarbeitete Fassung des „DNV's Standard for Certification No.2.22 Lifting Appliances“ [11] führt jedoch ebenfalls aus, dass im Falle einer umfassenden und sorgfältigen Dokumentation auch geringere Sicherheitsfaktoren angesetzt werden können. Das Institut für Maschinenwesen wird diesbezüglich auch zukünftig seine Industriepartner bei der sicheren und optimalen Auslegung des Systems Seil und Seiltrommel auf Basis einer wissenschaftlichen Grundlage unterstützen. Ebenfalls müssen jedoch zukünftig realistische Lastannahmen und Auslegungsrichtlinien durch die Zertifizierungsgesellschaften spezifiziert werden, die auf einer wissenschaftlichen und nachvollziehbaren Grundlage basieren.

3.1 Untersuchungen zur Querelastizität E_{SQ} von Seilen mit großem Nenndurchmesser

Um dem vermehrten Einsatz und Untersuchungsbedarf bei Seildurchmessern $>32 \text{ mm}$ Rechnung zu tragen, wurde am Institut für Maschinenwesen ein mobiles Querprüfgerät zur Bestimmung des charakteristischen Querelastizitätsmoduls E_{SQ} unter variabler Längsspannung entwickelt. Die lastabhängige Kenngröße kann nunmehr im konkreten Anwendungsfall (Krane, Schiffe etc.) geprüft und bestimmt werden. Die zur Querelastizitätsmessung erforderlichen variablen Seilzugkräfte werden hierbei nicht mehr wie bisher „künstlich“ mittels einer Hydraulik am stationären Prüfgerät (**Abbildung 7**) aufgebracht, vielmehr erfolgt eine Einstellung reeller Einsatzbedingungen vor Ort durch die eigentliche Last selbst. Zur Bestimmung des charakteristischen Kennwertes E_{SQ} ist zu bemerken, dass nicht die Durchmesserreduzierung des Seiles unter Längsvorspannung relevant ist. Vielmehr ist das Elastizitätsverhalten unter einer zusätzlich wirkenden Querkraft die Zielgröße.



Abbildung 21: Mobiles Querprüfgerät für große Seilennendurchmesser im Einsatz

Abbildung 21 zeigt die Messeinrichtung im Einsatz: die Anordnung besteht im Wesentlichen aus einem Hochdruckhydraulikzylinder, welcher über variable Stempelgeometrien eine Prüfkraft in die im Prüfstand befindliche Drahtseilanordnung einleitet. Als Messgrößen werden die in Seilquerrichtung aufgebrauchten Kräfte sowie ein Messweg unter der eingestellten Last erfasst (vergl. Kapitel 2.1 sowie 3).

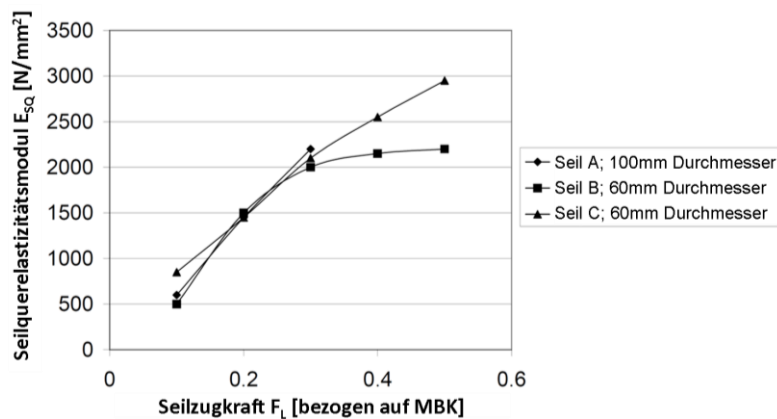


Abbildung 22: E_{SQ} in Abhängigkeit von k_L ; $k_Q = 0.07$; 1. Lage

Als Ergänzung zu dem seit nun mehr als 10 Jahren am Institut vorhandenen stationären Prüfaufbau können mittels des mobilen Querprüfgerätes gegenwärtig Drahtseile in einem Durchmesserbereich von 32 bis 100 mm unterschiedlichster Machart in bis zu 3 Lagen geprüft werden. Die so ermittelten Kennwerte dienen unter Verwendung einer geeigneten Dimensionierungsmethode der sicheren Auslegung von Trommelkörpern. **Abbildung 22** zeigt eine Auswahl von drei untersuchten Seiltypen unterschiedlicher Machart, der wesentliche Unterschied bestand hierbei vor allem im Nenndurchmesser. Sämtliche Prüflinge sind gängige, im Offshore-Bereich eingesetzte Zugmittel. Erkennbar ist hier vor allem eine höhere Quersteifigkeit der untersuchten Seilkonstruktionen im Vergleich zu ihren Varianten mit geringerem Nenndurchmesser, ebenso konnten Einflüsse auf die Seilquersteifigkeit durch die Nutzungsdauer identifiziert werden. Die experimentelle Bestimmung des Seilquerspannungsmoduls fand im Rahmen mehrerer Industrieprojekte statt, sodass aus Gründen der Geheimhaltung an dieser Stelle leider keine detaillierten Informationen angegeben werden können.

Weiterhin legt die Auswertung der Querelastizitätsmessungen an Seilen unterschiedlicher Durchmesser die Annahme nahe, dass in Abhängigkeit vom einlagig bestimmten Querelastizitätsmodul eine Aussage zum Querspannungsmodul von Seilen bei mehrlagiger Bewicklung möglich ist. In **Abbildung 23** ist für sechs Seile unterschiedlichem Aufbaus und Seildurchmessers eine Normierung der Querelastizitätsmodule auf den Referenzwert bei einlagiger Bewicklung erfolgt.

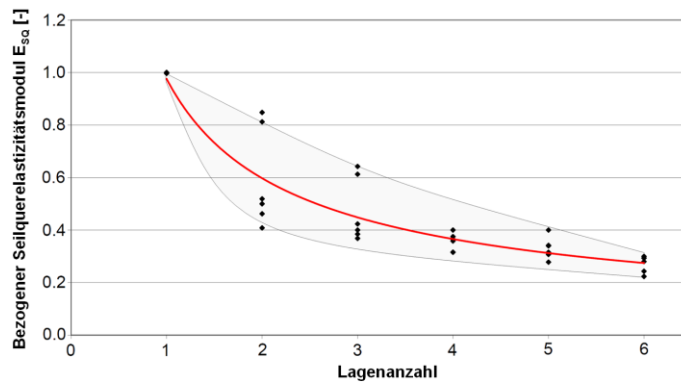


Abbildung 23: Normierte Querelastizitätsmodule in Abhängigkeit der Lagenanzahl bei einer Längskraft von 10 % der Mindestbruchkraft für sechs Seile mit unterschiedlichen Nenndurchmessern

Die Ausgleichfunktion erlaubt anhand des einlagig bestimmten Seilquerelastizitätsmodules eine Aussage zum Verhalten bei mehrlagiger Bewicklung. Mit Hilfe des mobilen Querprüfgeräts lassen sich sowohl Quersteifigkeiten als auch Längssteifigkeiten für Seile mit einem Durchmesser bis 100 mm bestimmen. Mit diesem Verfahren wäre ein wichtiger Schritt in Richtung einer realitätsnahen Auslegung von Seiltrommeln in diesem Seildurchmesserbereich möglich. Darüber hinaus sind Aussagen zur Quersteifigkeit bei einer geänderten Prüfkraft in Querrichtung mit Hilfe von Ausgleichsfunktionen möglich. Zur Qualitätsverbesserung der Ausgleichsfunktionen werden gegenwärtig weitere Quersteifigkeitswerte von Seilen ausgewertet. In naher Zukunft soll eine abgesicherte Datenbasis für Seile bis 32 mm Seildurchmesser vorliegen. Ebenfalls geklärt werden muss, ob diese Ausgleichsfunktionen uneingeschränkt für Seile im Nenndurchmesserbereich über 40 mm Gültigkeit besitzen, hier sind weitere Forschungsaktivitäten unabdingbar.

3.2 Alternativen für die Bestimmung der Seileigenschaften

Neben der in zuvor in Kap. 2.1 sowie 3 dargestellten experimentellen Bestimmung der Seilquersteifigkeit bzw. des Seilpaketes treten im IMW der TU Clausthal zunehmend numerische Betrachtungen zur Bestimmung des Seilquermodules E_{SQ} mittels der Finite-Elemente-Methode in den Vordergrund.

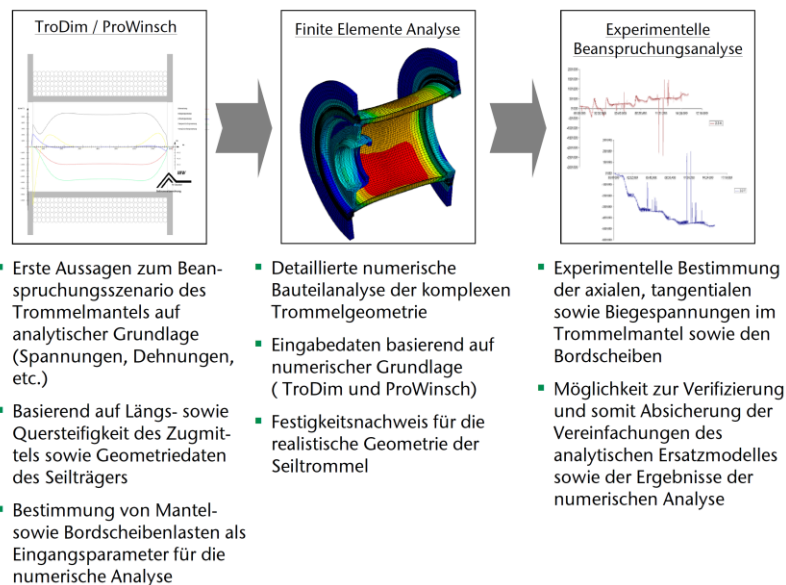


Abbildung 24: Vorgehensweise am IMW zur Bestimmung des Beanspruchungsszenarios einer Seiltrommel

Wird der numerische Festigkeitsnachweis an der Seiltrommel am IMW vorrangig kombiniert analytisch und numerisch beschritten (vgl. **Abbildung 24**), führte die Betrachtung eines Seiles oder gar Seilpaketes aufgrund notwendiger Netzfeinheit bzw. lokal gezielter Elementierung rasch an die Grenzen der Rechnerleistungsfähigkeit. Hierfür wurden in der Vergangenheit vereinfachte Betrachtungen bzw. Ersatzmodelle notwendig, die die Realität und ihre Einflussgrößen hinreichend nachzubilden versuchten. Insbesondere der Seilaufbau, gekennzeichnet durch eine komplexe Geometrie, wechselwirkend durch reibungsbehaftete Kontakte, beschrieben durch elastisch-plastisches Werkstoffverhalten erschwerten oftmals die realitätsnahe Nachbildung des Systems in der numerischen Simulation. Zwar gelang in Industrie wie auch Forschung erfolgreich die Modellierung und Simulation einfacher und auch anspruchsvoller

Seilkonstruktionen [13], [14], [15]. Die Autoren weisen jedoch ebenfalls auf die erheblichen zeitlichen, finanziellen und technischen Aufwendungen für die Grundlagenforschung hin. Um die zeit- und kostenintensive experimentelle Analyse der Seilquersteifigkeit des Seiles bzw. Seilpaketes zu minimieren, kann unter anderem diese Größe mittlerweile numerisch mittels entsprechender Volumenmodelle bestimmt und verifiziert werden.

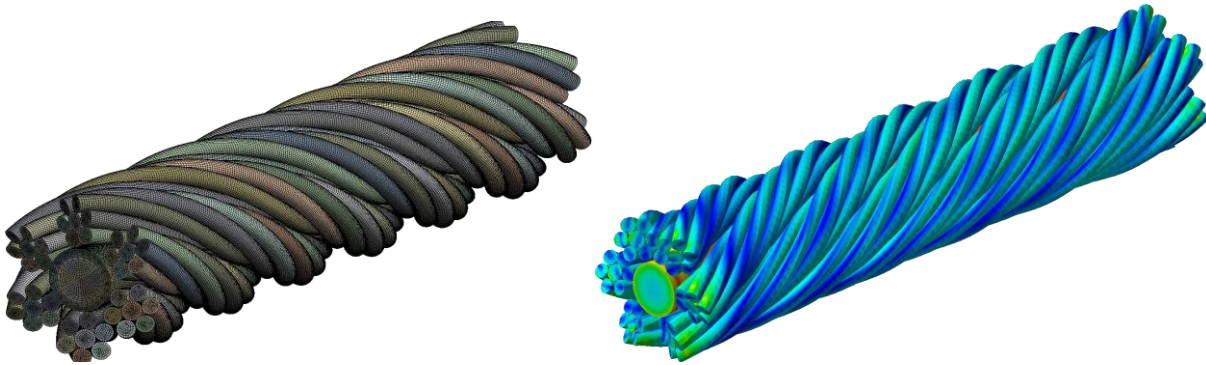


Abbildung 25: Exemplarische Darstellung eines vernetzten Volumenmodelles sowie numerisch bestimmte Vergleichsspannung nach von Mises an einer einfachen Seilkonstruktion

Schwerpunkte der Modellerstellung und damit auch wesentliche Einflüsse hinsichtlich der Ergebnisgüte liegen vorrangig in der realitätsgetreuen Nachbildung der Seilkonstruktion, einer geeigneten Netzsteuerung sowie einer Verfeinerung der Elementierung in Bereichen von besonderem Interesse. Als wesentlich sind hierbei die Kontaktbereiche zwischen Lagendrähten sowie zwischen Außenlitze und Seileinlage zu nennen.

Abbildung 25 zeigt exemplarisch die Vernetzung einer einfachen Seilkonstruktion. Wesentliche Benefits durch die Nutzung der Finite-Elemente-Methode bestehen in der Möglichkeit zur numerischen Bestimmung charakteristischer Seileigenschaften (bspw. Längs- / Querdehnung sowie Dreharmut des Seiles) und damit der Eigenschaftsabsicherung virtueller Prototypen sowie der Bestimmung struktureller Eigenschaften innerhalb des Seiles bzw. Seilpaketes. Als eine Struktureigenschaft des Draht- wie auch Faserseiles ist unter anderem der Reibungszustand im Seilinneren zu nennen, der im Wesentlichen durch die Kontaktpartner und ein in den meisten Anwendungsfällen vorhandenes Schmiermittel (Graphit, Fett auf Petrolatumbasis, etc.) bestimmt wird.

Die Darstellung des Einflusses von Schmierzustand, etwaiger Korrosion, Verunreinigung, eingebrachten Fremdkörpern auf charakteristische Seileigenschaften wie bspw. den Querelastizitätsmodul E_{SQ} und damit auf die Seiltrommelbeanspruchung ist experimentell lediglich durch umfangreiche Messkampagnen nachzuweisen und seit längerer Zeit ein Thema. Die Finite-Elemente-Methode bietet hier durch eine Parameterstudie die Möglichkeit zur gezielten Variation des Schmierkontaktes. **Abbildung 26** zeigt exemplarisch die Abhängigkeit des numerisch bestimmten Seilquerelastizitätsmodules E_{SQ} für eine Parametervariation des Reibbeiwertes im Schmierkontakt an einer realen Seilkonstruktion.

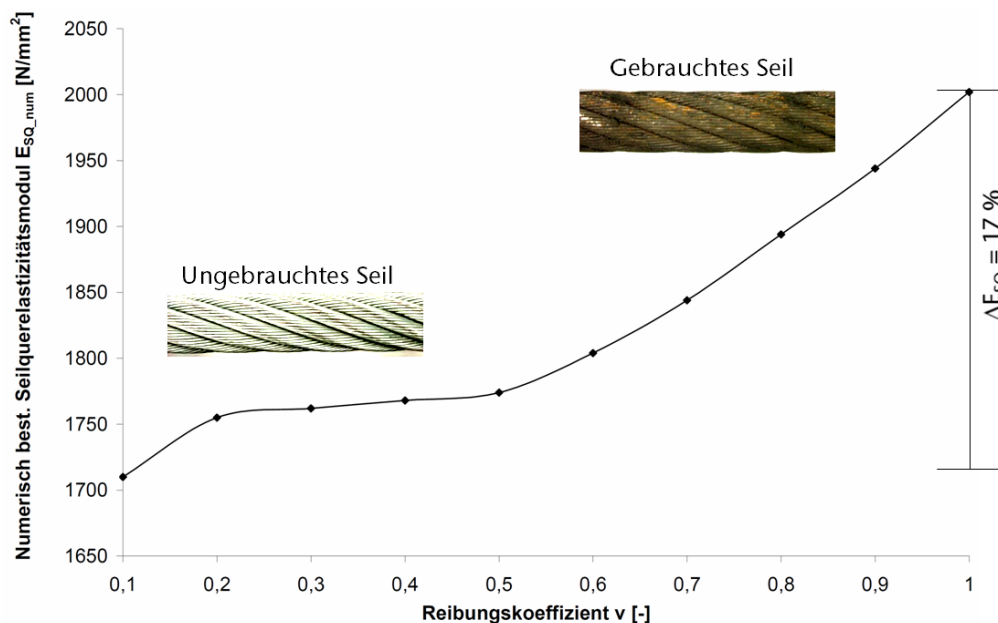


Abbildung 26: Numerisch bestimmte Seilquersteifigkeit E_{SQ_num} an einem realen Seilaufbau, einlagig, in Abhängigkeit des Reibbeiwertes ν für $k_L = 0,2$ (20% MBF); $k_Q = 0,07$

Diese Tendenz lässt mittelbar Rückschlüsse auf die Veränderungen im Beanspruchungsszenario der Seiltrommel zu: ein durch die Reibungsverhältnisse innerhalb des Seiles erhöhter Reibbeiwert erhöht unter Umständen ebenfalls die Seilquersteifigkeit, ausgedrückt durch den Seilquerelastizitätsmodul E_{SQ} , um bis zu 20% (vgl. **Abbildung 26**). Unter Berücksichtigung von **Abbildung 19** impliziert ein bis zu 20% höherer Querelastizitätsmodul E_{SQ} bei einer mit fünf Lagen bewickelten Seiltrommel ebenfalls eine Erhöhung der Vergleichsspannung nach v. Mises im Trommelmantel um bis zu 10%, unter Annahme eines symmetrischen Lastfalles. Demnach ist zu vermuten, dass der (Schmier-)Zustand des Seiles im Verlauf der Nutzungsdauer eine nicht vernachlässigbare Einflussgröße auf das Beanspruchungsszenario der Seiltrommel darstellt. Weiterführende Untersuchungen bestehen derzeit in der Versuchsauswertung der experimentellen Verifizierung (vgl. Kapitel 3.1) sowie in Grundlagenversuchen zur realistischen Eingrenzung der Reibbeiwertbandbreite innerhalb der Seilkonstruktion.

Aufgrund des hohen Aufwandes im Zuge der Modellerstellung sowie -vernetzung wird ebenfalls ein parametrisiertes Seilmodell vorangetrieben. Vorteile liegen hierbei vor allem in der automatisierten Modellerstellung durch einschlägige Parameter wie bspw. Seilkonstruktion, Seilaufbau, Art der Einlage, Litzenkonstruktion, Schlagrichtung, Schlaglänge sowie der eventuelle Einsatz einer Kunststoffummantelung des Kernes oder des gesamten Seiles. **Abbildung 27** zeigt Ausschnitte der Eingabemaske sowie zwei Varianten eines erstellten, parameterbasierten Volumenmodells einer einfachen Seilkonstruktion.

Die gezeigten Ergebnisse geben lediglich einen Ausblick auf die Möglichkeiten, die sich durch den Einsatz der Finite-Elemente-Methode im Bereich der Seiltechnik bieten. Zum einen können Beanspruchungen im Seil detailliert identifiziert und bewertet werden, zum anderen bietet sich die Möglichkeit zur Bestimmung charakteristischer Seileigenschaften, wovon lediglich einige genannt wurden. Langfristig kann die Finite-Elemente-Methode als flankierende Maßnahme zu bewährten experimentellen Methoden einen wesentlichen Beitrag zur Optimierung des Gesamtsystems Seil-Seiltrommel leisten.

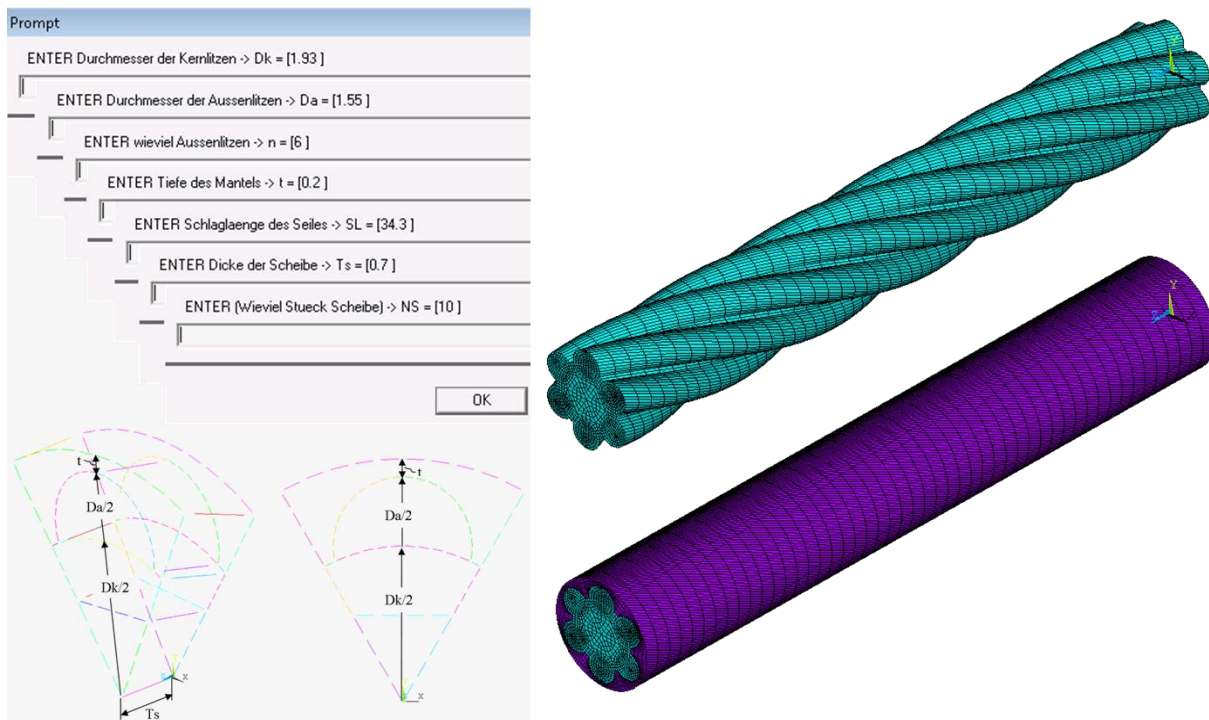


Abbildung 27: Eingabemaske sowie zwei Varianten eines erstellten, parameterbasierten Volumenmodells einer einfachen Seilkonstruktion

4 Untersuchungen mehrlagig bewickelter Seiltrommeln 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 bspw. aus aromatischem Polyamid oder Polyethylen in Hybrid- oder reiner Kunststoffbauart auf den Markt als auch zum Einsatz bei mehrlagiger Bewicklung von Seiltrommeln [16], [17]. Die Einflussnahme auf das Trommelverhalten infolge der andersartigen Seileigenschaften ist aber noch weitestgehend unbekannt. Mit dem Einsatz der Kunststoffseile auf Seiltrieben steht man demzufolge heute vor einem ähnlichen Problem wie Anfang der 90er Jahre auf dem Gebiet der Drahtseile. Damals kam es beispielsweise vermehrt zu Schäden an Seiltrommeln, die nach dem derzeit gegenwärtigen Stand der Technik ausgelegt worden waren. Untersuchungen am Institut für Maschinenwesen zeigten seinerzeit, dass die Ursache hierfür in nicht mehr zeitgemäßen Daten für die Querelastizitätsmoduln der Seile lag.

Während das Kriechverhalten von Kunststoffseilen, ihre Biegegewichselfestigkeit und deren Längselastizität bereits ansatzweise erforscht wurden, liegen über das allgemeine Verhalten von Kunststoffseilen auf Windentrommeln und die Quersteifigkeit dieser Seile bei mehrlagiger Bewicklung keine belastbaren experimentellen Ergebnisse vor. Damit ist ein wichtiger Parameter für eine gezielte Anpassung des Windentrommeldesigns an die Erfordernisse der Kunststoffseile noch unbekannt. Eine gezielte Optimierung der Quersteifigkeit von Kunststoffseilen im Hinblick auf eine möglichst günstige Trommelbeanspruchung ist deshalb bis jetzt nicht durchführbar. Heutige industrielle Anwendungen beschränken sich deshalb – abgesehen von wenigen Anpassungskonstruktionen, z.B. bei Deepwater-Installationen [18] (vgl. ebenfalls **Abbildung 28**) – auf eine einlagige Bewicklung der Trommel.

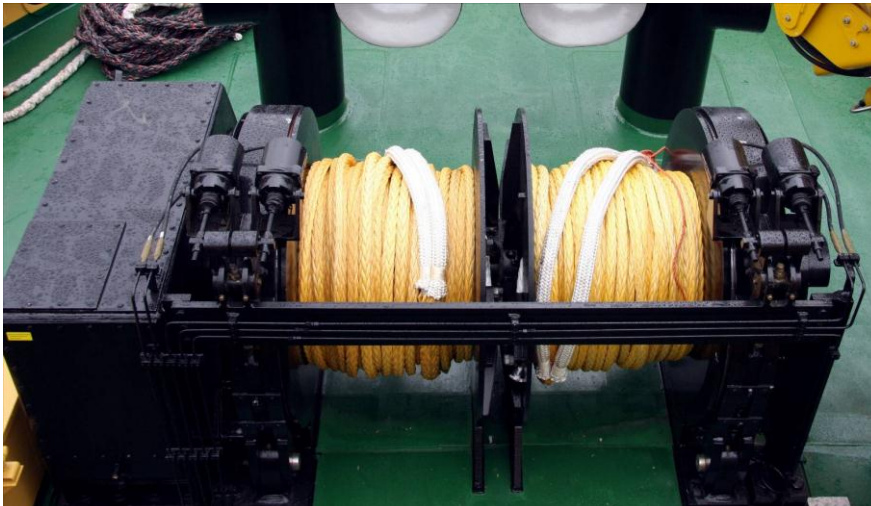


Abbildung 28: Doppelwinde mit 40mm Hochleistungsfaserseil

Ebenfalls ungeklärt ist der Einfluss vollsynthetischer Seile auf die Windentrommelbeanspruchungen im Zuge einer Mehrlagenbewicklung. Kunststoffseile werden deshalb heute entweder in Verbindung mit Treibscheibenwinden eingesetzt oder lediglich einlagig auf eine Windentrommel gewickelt. Letzteres begrenzt die Anwendbarkeit dieser Technologie, weil nur geringe Seillängen realisiert werden können. Um das gesamte Potential der Kunststoffseile beispielsweise auch im Kranbau nutzen zu können, ist jedoch eine Mehrlagenbewicklung unumgänglich, machen doch gerade die spezifischen Eigenschaften von Kunstfaser- und Hybridseilen sie unter anderem für den Kranbau durch enorme Vorteile, wie beispielsweise eine höhere Bruchfestigkeit bei deutlich geringerem Gewicht, sehr interessant. Die maximale Tragfähigkeit eines Kranes oder Tiefwassereinsatz wird heutzutage durch die eingesetzten Stahlseile begrenzt, da diese bei großen Längen aufgrund ihres Eigengewichtes reißen [19].

4.1 Untersuchungen zum Querelastizitätsmodul E_{SQ} an herkömmlichen Faserseilen

Um Rückschlüsse auf die aus der mehrlagigen Bewicklung mit Faserseilen resultierenden Einflüsse auf das Beanspruchungsszenario der Windentrommel zu ziehen, wurden am IMW Untersuchungen zur Querelastizität an gebräuchlichen Kunstfasergeflechten durchgeführt. Hierbei handelte es sich um 12-litzige Rundgeflechte ohne Mantel im Kreuzschlag geflochten in den Durchmesservarianten 6 sowie 12 Millimeter aus den Materialien Dyneema SK75, Vectran T150 sowie Technora T221. **Abbildung 29** zeigt die ermittelten Seilquerelastizitätsmoduln in Abhängigkeit des Längskraftverhältnisses k_L sowie ein Querkraftverhältnis k_Q von 0.1 für die beiden Durchmesservarianten.

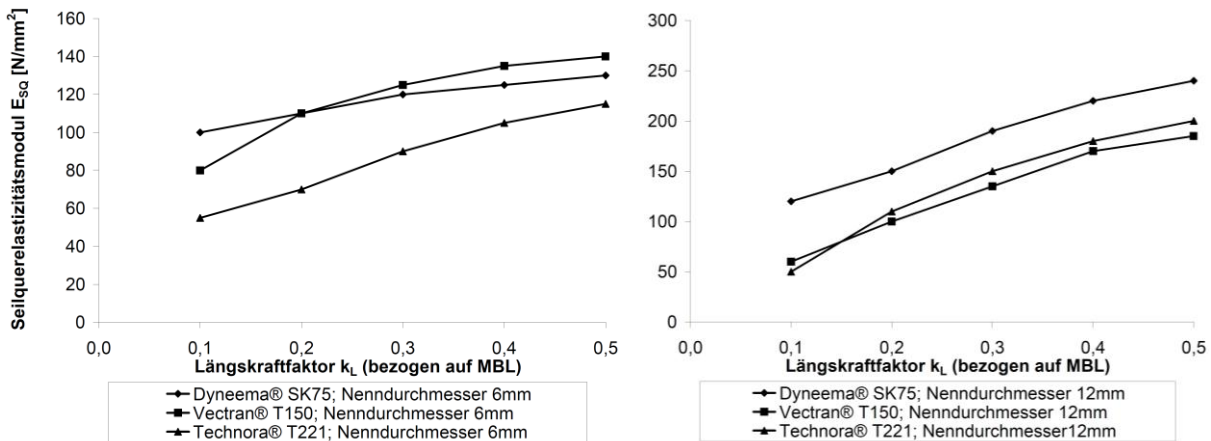


Abbildung 29: Seilquerelastizitätsmodul E_{SQ} für verschiedene Fasermaterialien, 6mm und 12mm Nenndurchmesser in Abhängigkeit von k_L ; $k_Q = 0.1$; 1. Lage

Die Abbildungen zeigen bei beiden Durchmesservarianten der geprüften Faserseilvarianten einen im Vergleich zum Stahlseil (vgl. **Abbildung 9, 22**) wesentlich geringeren Querelastizitätsmodul und damit eine geringere Seilquersteifigkeit. Obgleich das Fasergeflecht aus Dyneema SK75 eine leicht höhere Quersteifigkeit im direkten Vergleich der Fasergeflechte aufweist, ist eine ähnlich dem Stahlseil adäquate Spulbarkeit des Zugmittels auf einer Windentrommel aufgrund des geringen Quermodules unwahrscheinlich – der Erfahrungswert hinsichtlich der Querelastizität zur einwandfreien Wickelbarkeit eines Seiles bzw. Fasergeflechtes legt hierfür einen Mindestwert von ca. 400 N/mm^2 fest.

4.2 Exemplarischer Spulversuch zum Wickelverhalten von Faserseilen

In Ergänzung zu den vorhergehenden Steifigkeitsuntersuchungen wurde das Wickelverhalten eines Seiles aus Dyneema SK75 (Kern-Mantelgeflecht, Nenndurchmesser 14 mm, 32-fach geflochtener Mantel) auf dem institutseigenem Windenprüfstand (vgl. **Abbildung 10**) in Form eines Dauerversuches untersucht. Das Fasergeflecht wurde dabei im Zuge eines Spulversuches mit einer Seilzugkraft von 20% der Mindestbruchkraft bei einer Seilgeschwindigkeit von 20 m/min in 5 Lagen auf eine gegossene Trommel gewickelt. Ab der zweiten Seillage konnte hierbei ein unregelmäßiges Spulbild aufgrund einer starken Abplattung des Seiles durch ansteigenden Querdruck beobachtet werden. Ein stabiles Seilpaket stellte sich durch die starke Verformung des Seiles nicht ein. Die Unregelmäßigkeiten kumulierten sich im weiteren Spulungsprozess auf, was bis hin zum Überspringen einzelner Windungen führte. Es bildeten sich unregelmäßige Lücken, was ab der dritten Seillage insbesondere in den Aufstiegsbereichen zu vergrößerten Zwischenräumen führte, in die das Seil abglitt (vgl. **Abbildung 30**). In der Praxis wurden ähnliche Phänomene beobachtet [18]. Das Einschneiden einzelner Wicklungen in darunter liegende Seillagen ist einerseits hinsichtlich des Seilverschleißes (Abrasion sowie Wärmeentwicklung), andererseits hinsichtlich eines plötzlich eintretenden, unkontrollierten Beanspruchungszustandes der eingesetzten Windentrommel als äußerst problematisch anzusehen. Zum einen gilt es demnach, eine Seilkonstruktion bzw. Seilfaser mit hoher lateraler Steifigkeit zu identifizieren sowie andererseits die Trommelung des Zugmittels durch eine geeignete Profilierung von Trommelmantel sowie Bordscheibe zu unterstützen.

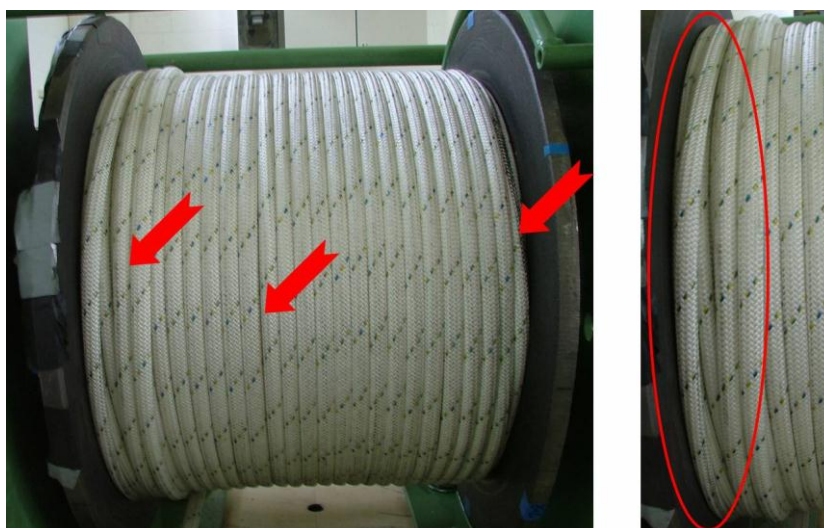


Abbildung 30: Unregelmäßiges Spulbild eines Kern-Mantel-Geflechtes aus DYNEEMA SK 75 Ø 14mm

4.3 Numerische Bestimmung der im Zuge der mehrlagigen Bewicklung mit Faserseilen auftretenden Seiltrommelbeanspruchungen

Wie bereits dargestellt, gestaltet sich das Beanspruchungsszenario einer mehrlagig bewickelten Windentrommel grundsätzlich abhängig vom verwendeten Zugmittel. Während die auftretenden Beanspruchungen für Draht- wie auch Hybridseile bereits erläutert wurden (vgl. Kapitel 2), ist abschließend auf die charakteristischen Auswirkungen durch eine mehrlagige Bewicklung mit einem Faserseil einzugehen. Der in **Abbildung 24** dargestellte Workflow erlaubt mit Kenntnis der Seilquersteifigkeit sowie einer vorhandenen Windentrommelgeometrie die numerische Analyse der Trommelstruktur. Im Folgenden sollen daher exemplarisch die charakteristischen Unterschiede in der Beanspruchungssituation einer mit LEBUS®-Rillungssystem versehenen Windentrommel bei Bewicklung mit einem Stahlseil im Vergleich zur Bewicklung mit einem Kunststoffseil dargestellt werden.

Equivalent Stress
Type: Equivalent (von-Mises) Stress
Unit: MPa

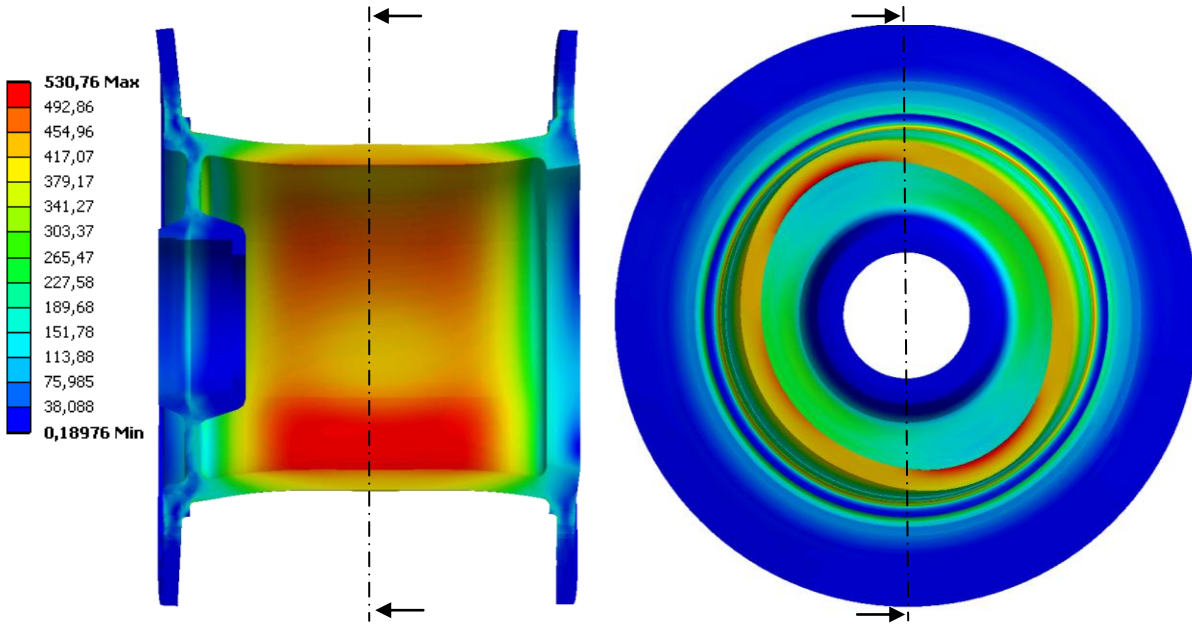


Abbildung 31: Vergleichsspannung nach von Mises in der Trommelstruktur bei Bewicklung mit einem Stahlseil, 6 Lagen, $E_{SL} = 75000 \text{ N/mm}^2$; $E_{SQ} = 1600 \text{ N/mm}^2$, Vergrößerungsfaktor = 44

Equivalent Stress
Type: Equivalent (von-Mises) Stress
Unit: MPa

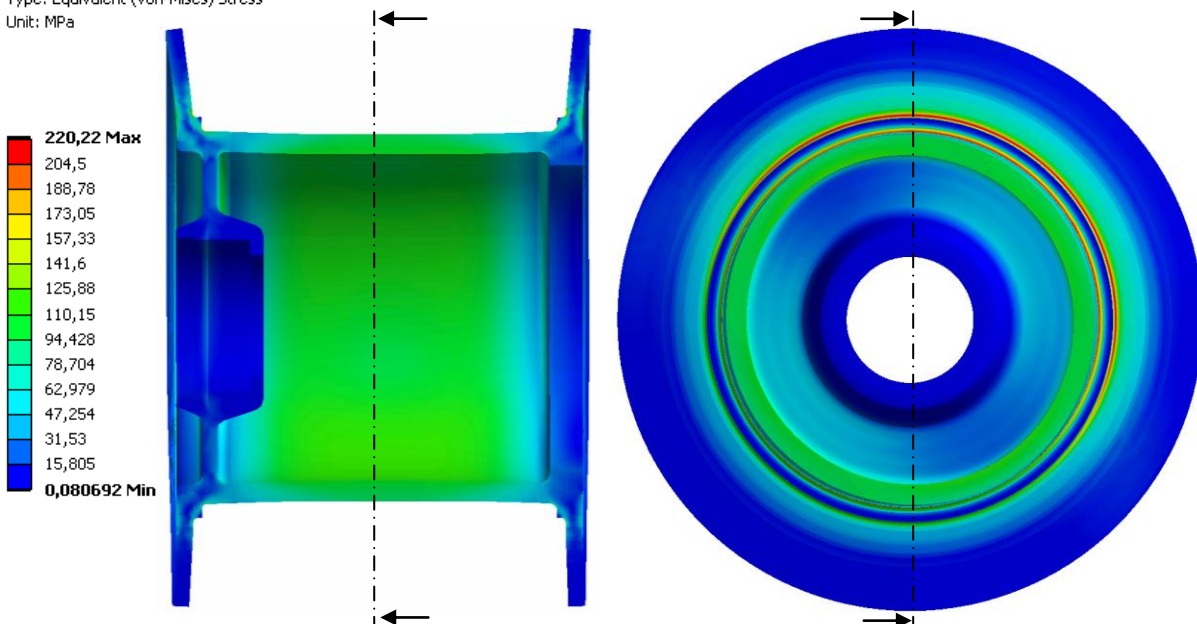


Abbildung 32: Vergleichsspannung nach von Mises in der Trommelstruktur bei Bewicklung mit einem Kunststoffseil, 6 Lagen, $E_{SL} = 39000 \text{ N/mm}^2$; $E_{SQ} = 140 \text{ N/mm}^2$, Vergrößerungsfaktor = 44

Als Fallstudie dient hierbei die Bewicklung einer gegossenen Trommel mit jeweils sechs Seillagen bei einer Seilzugkraft von 20 kN. Die Zugmittel werden hierbei lediglich durch ihre jeweiligen Längs- sowie Quersteifigkeiten charakterisiert: das Stahlseil weist dabei einen Längselastizitätsmodul E_{SL} von ca. 75000 N/mm² sowie einen Querelastizitätsmodul von E_{SQ} von 1600 N/mm² auf (vgl. **Abbildung 9**), das Kunststoffseil wird hingegen durch einen Längselastizitätsmodul E_{SL} von ca. 39000 N/mm² sowie einen Querelastizitätsmodul von E_{SQ} von 140 N/mm² beschrieben (vgl. **Abbildung 29**). Der resultierende Beanspruchungszustand in beiden Fällen, beschrieben durch die Vergleichsspannung nach v. Mises, ist in **Abbildung 31** sowie **32** dargestellt. Betrachtet wird hierbei zunächst die Trommel im Querschnitt, geschnitten entlang der Längsachse (links), als auch Trommelmantel sowie Bordscheibe im Profil, geschnitten entlang der Hochachse (rechts).

Die Ergebnisse der numerischen Simulation identifizieren in Folge der Stahlseilbewicklung (vgl. **Abbildung 31**) ein Vergleichsspannungsmaximum in Höhe von ca. 530 N/mm² sowie deutliche, unsymmetrische Verformungen im Trommelmantel. Charakteristische Bereiche des Trommelmantels, bedingt durch einen unsymmetrischen Belastungszustand aufgrund des LEBUS®-Rillungsystems, stellen in diesem Szenario eindeutig die höchstbeanspruchte Stelle des Bauteils dar. Typische Schadensbilder dieses Lastfalles wurden in Kapitel 3 genannt bzw. in **Abbildung 20** illustriert.

Gänzlich anders gestaltet sich hingegen das Beanspruchungsszenario im Zuge der Bewicklung mit einem Kunstfaserseil (vgl. **Abbildung 32**): aufgrund der geringen Quersteifigkeit des Fasergeflechtes verringert sich die Belastung des Trommelmantels immens, unsymmetrische Verformungen im Vergleich zu **Abbildung 31** sind auf ein Minimum reduziert. Ein Vergleichsspannungsmaximum in Höhe von lediglich ca. 220 N/mm² wird nunmehr nicht im Trommelmantel, vielmehr im Bereich der festlagerseitigen Bordscheibe identifiziert. Ebenso treten gegenüber der Stahlseilbewicklung höhere Deformationen im Bereich der Bordscheiben auf, denen ebenfalls wirksam begegnet werden muss.

Selbstverständlich sind die beschriebenen Phänomene quantitativ lediglich gültig für die exemplarisch dargestellte Trommelgeometrie, sie zeigen jedoch klare Tendenzen auf, die gegenwärtige Problematiken (vgl. Kap. 3 bzw. 3.1) teilweise entspannen können, andererseits neue Fragen aufwerfen bzw. Gestaltungsmöglichkeiten des Gesamtsystems Seil-Seiltrommel eröffnen.

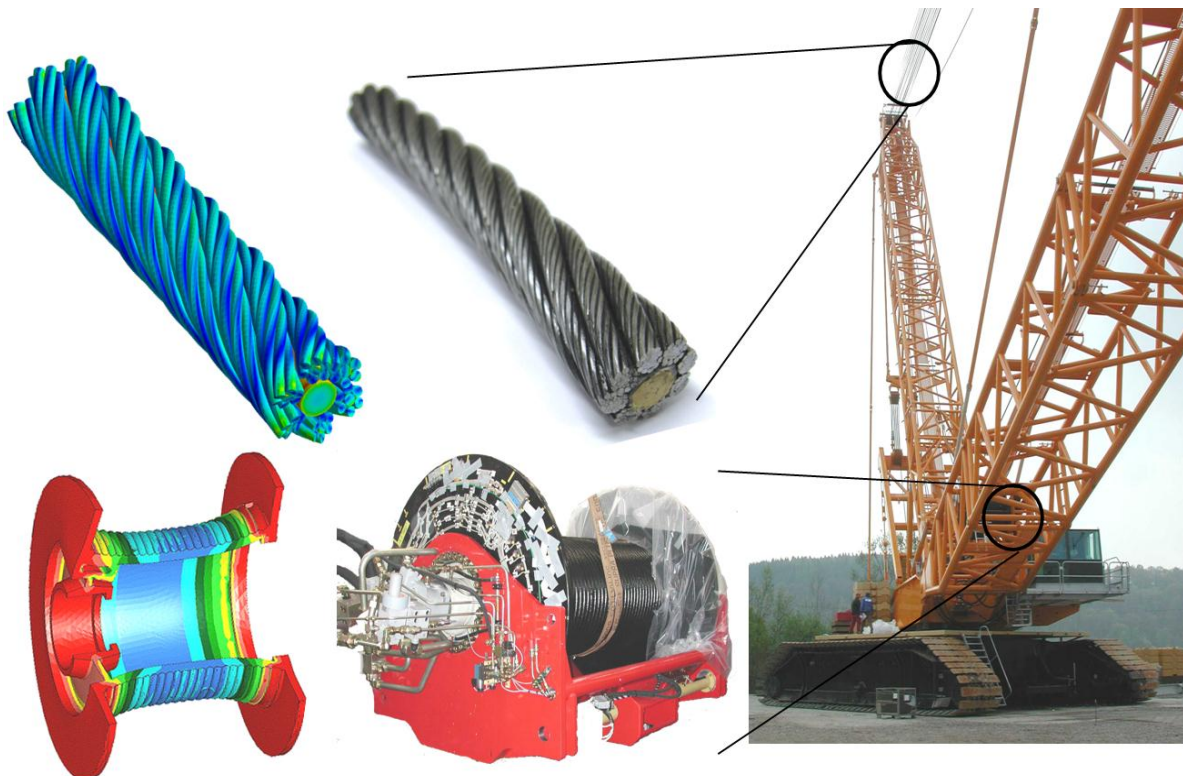


Abbildung 33: Das Gesamtsystem Seil und Seiltrommel

Eine Änderung charakteristischer Seileigenschaften durch den Einsatz synthetischer Seile wie beispielsweise deren Biegesteifigkeit, Längs- sowie Querelastizität führt demnach zu einer dramatischen Änderung der Belastungen auf das System Seil und Seiltrommel und gleichzeitig zu neuen Schädigungsmechanismen, die eine unterschiedliche Dimensionierung der Seiltriebelemente zur Folge haben müssen.

Durch die im Vergleich zu Stahlseilen geringere Formstabilität der Faserseile unter Last stellen sich andersartige mechanische Belastungen an Trommelmantel sowie Bordscheiben (Flächenpressungen, Biegebeanspruchung, Zug-/ bzw. Druckbeanspruchungen, Spannungsspitzen, Reibung/Abrasion usw.) ein. Die konstruktive Gestaltung der Trommel (Wandstärke der Trommel, Dicke der Bordscheiben, Übergang Bordscheibe zu Trommel etc.) muss demnach hierfür in großen Teilen neu definiert werden.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Drahtseile sind aus dem heutigen Alltag nicht mehr wegzudenken. Diesen Erfolg hätte sich der Clausthale Oberberggrat Albert im Jahr 1834 wohl kaum träumen lassen, richtete sich sein berechtigter Stolz doch „nur“ auf die Lösung eines brennenden, schon Existenz bedrohenden Problems im Bergbau.

Die Einblicke in die Forschungsaktivitäten des Clausthale Instituts für Maschinenwesen zeigen, dass die Problemstellungen um die Maschinenelemente Seil und Seiltrommel in Praxis wie Forschung auch nach mittlerweile 177 Jahren noch nicht abschließend gelöst sind [21]. Durch den Einsatz neuer Materialien und gesteigerter Einsatzbedingungen ist eine Fortführung der Forschung auf diesem Gebiet zwingend erforderlich.

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, Seilschwingungen, Ermüdung, Verschleiß etc.) ist ein wesentlicher Hinderungsgrund für die zügige Einführung neuer, marktreifer Produkte, welche die innovativen Potentiale der Kunststoffseile in vollem Umfang nutzen.

Weitere Untersuchungen sind bezüglich der in der See- und Offshoretechnologie eingesetzten Seile mit mehr als 100 mm Durchmesser erforderlich. Die Kenntnis der Steifigkeitseigenschaften von Seilen ist in Bezug auf ein zuverlässiges Verhalten von Seil und Trommel unabdingbar. Alterungsprozesse bei einem eingesetzten Seil beeinflussen zudem die Reibungsverhältnisse im Seil und somit die Elastizität des Seiles, für eine sichere Auslegung ist dieser Sachverhalt nicht zu vernachlässigen.

Neue Prüfverfahren und leistungsstarke Computertechnologie schaffen die Möglichkeit für weitere Untersuchungen mit dem Ziel einer Leistungsfähigkeitssteigerung des Systems Seil-Seiltrommel. Die Aufgabe der wissenschaftlichen Forschung besteht darin, eine Designspezifizierung auszuarbeiten, die sowohl für den Endverbraucher als auch für Entwicklungsingenieur anwendbar ist und das eingesetzte Seil mit seinen Eigenschaften berücksichtigt.

Erhöhte Anforderungen, neue Materialien sowie Produktionsverfahren verlangen demnach innovative Lösungen für das "alte" Maschinenelement-Seil und Seil-Trommel für wichtige Transportaufgaben auch in der heutigen Zeit.

References

- [1] Dietz, P. *Ein Verfahren zur Berechnung ein- und mehrlagig bewickelter Seiltrommeln*; Dissertation, TH Darmstadt, Darmstadt, 1971.
- [2] Ernst, H. *Untersuchung über die Beanspruchung der Seiltrommeln von Kranen und Winden*; Mitteilungen aus den Forschungsanstalten, 6, 1938.
- [3] Henschel, J. *Dimensionierung von Windentrommeln*; Dissertation, TU Clausthal, Verlag und Vertriebsgesellschaft mbH, Düsseldorf, 2000.
- [4] Mupende, I. *Beanspruchungs- und Verformungsverhalten des Systems Trommelmantel - Bordscheiben bei mehrlagig bewickelten Seiltrommeln unter elastischem und plastischem Werkstoffverhalten*; Dissertation, TU Clausthal, Clausthal-Zellerfeld, 2001.
- [5] Kraitschy, H. *Beanspruchung der Bordscheiben von Seiltrommeln*; Dissertation, TU Rostock, Rostock, 1973.
- [6] Neugebauer, H.-J. *Berechnungsverfahren für ein- und mehrlagig bewickelte Seiltrommeln*; Dissertation, TU Dresden, Dresden, 1979.
- [7] Otto, St. *Ein nicht-rotationssymmetrisches Belastungsmodell für die Ermittlung des Beanspruchungsverhaltens mehrlagig bewickelter Seiltrommeln*; Dissertation, TU Clausthal, Clausthal-Zellerfeld, 2003.
- [8] 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.
- [9] Lohrengel, A. and Schwarzer, T. *Gestaltung und Dimensionierung von Winden-trommeln bei mehrlagiger Bewicklung mit Kunststoffseilen*, Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben, Institut für Maschinenwesen der TU Clausthal, Clausthal-Zellerfeld, 2011.
- [10] Ridge, I.M.L., O'Hear, N., Verreet, R., Grabandt, O., Das, C.A. *High strength fibre cored steel wire rope for deep hoisting applications*, Proceedings OIPEEC 2007 / 2nd International Ropedays, Johannesburg, 2007.
- [11] Det Norske Veritas, DNV: *Standard for certification No. 2.22 – Lifting appliances*, Oslo, 2009.
- [12] Standards Australia International: *Australian Standard 1418.1-2002 – Cranes, hoists and winches, Part 1: general requirements*, Sydney, 2002.
- [13] Verreet, R. *Ingenieurbüro für Drahtseiltechnik, Firmenprofil – Was wir für Sie tun können*, Ingenieurbüro für Fördertechnik, Aachen, 2010.
- [14] Ziegler, S. *Einfluss der Drahtschwingfestigkeit auf die Lebensdauer von Seilen*; Dissertation, Universität Stuttgart, Stuttgart, 2007.
- [15] Usabiaga, H., Durville, D. *A finite element approach for modelling wire ropes*, Proceedings OIPEEC 2009 / 3rd International Ropedays, Stuttgart, 2009.
- [16] Rebel, G., Verreet, R. and Ridge, I.M.L. *Lightweight ropes for lifting applications*, Proceedings of the OIPEEC Conference, Athens, 2006.
- [17] O'Hear, N., Grabandt, O. and Hobbs, R.E. *Synthetic fibre ropes for mine winding*, Proceedings of the OIPEEC Conference, Athens, 2006.
- [18] Smeets, P.J.H.M. *New developments on ropes with Dyneema for running wire applications*, 4. Fachkolloquium InnoZug, Chemnitz, 2010.
- [19] Standing, R.G., Jackson, G.E. and 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.
- [20] Mercator Media Ltd *Damen delivers 'SD Reliable' - An important milestone*, Maritime Journal, Hampshire, 2009.
- [21] 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.