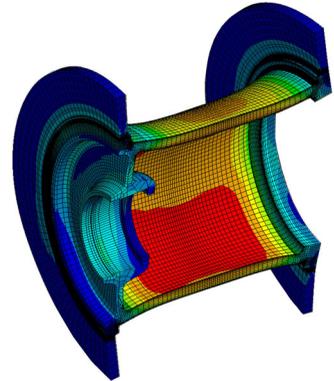


## Untersuchungen mehrlagig bewickelter Seiltrommeln mit Faserseilen

Lohrengel, A.; Stahr, K.; Wächter, M.



*Die in der Marine- und Offshore-Industrie stetig steigenden Anforderungen hinsichtlich Förderkapazität und -tiefe bedingen ebenso steigende Erfordernisse an Seile jedweder Machart. Die Forderung nach einem reduzierten Längengewicht, Korrosionsbeständigkeit, Umweltschonung, Sicherheit, Ergonomie sowie Personenschutz befürworten 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. Der sichere Einsatz der genannten Seiltypen in Kombination mit bestehenden Seiltrommelsystemen bedingt Kenntnis bezüglich des Einflusses der Seillängs- und Seilquersteifigkeiten auf die Trommelbeanspruchung sowie der sich über der Einsatzzeit verändernden Seileigenschaften.*

*Continuously rising requirements in marine and offshore technology on lifting capacity, depth and equipment reliability have led in turn to increasing demands on ropes of any kind. 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. 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.*

## 1 Einleitung

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 mehrlagigen Bewicklung mit Drahtseilen. /1/, /2/



TU Clausthal

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



Abbildung 1: Geschichte der Seil- und Seiltrommelforschung am IMW der TU Clausthal

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 /3/, /4/. 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 Biegeweichselfestigkeit 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 /5/ (Abbildung 2) – auf eine einlagige Bewicklung der Trommel.

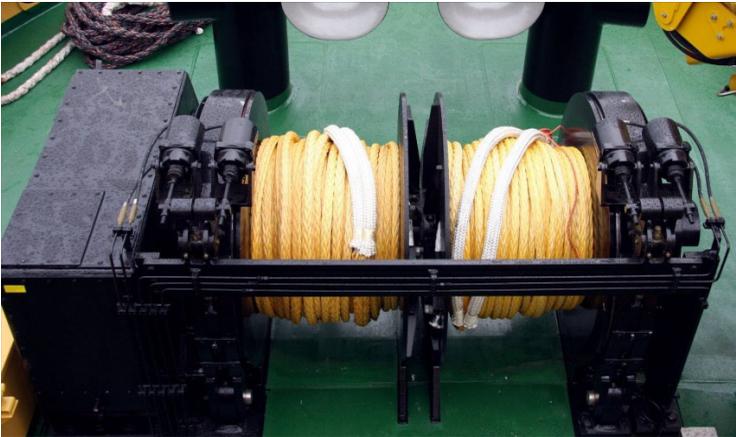


Abbildung 2: Doppelwinde mit 40mm Hochleistungsfaserseil /7/

Letzteres begrenzt die Anwendbarkeit dieser Technologie, da 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 Krans oder Tiefwassereinsatz wird heutzutage im Wesentlichen durch die eingesetzten Stahlseile begrenzt, da diese bei großen Längen aufgrund ihres Eigengewichtes reißen /6/.

## 2 Untersuchungen zum Querelastizitätsmodul $E_{SQ}$ an herkömmlichen Faserseilen

Um Rückschlüsse auf die aus der mehrlagigen Bewicklung mit Faserseilen resultierenden Einflüsse auf das Beanspruchungsszenario der Windtrommel 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 3 zeigt die ermittelten Seilquerelastizitätsmoduln in Abhängigkeit des Längskraftverhältnisses  $k_L$  sowie ein Querkraftverhältnis  $k_Q$  von 0,1 für die beiden Durchmesservarianten.

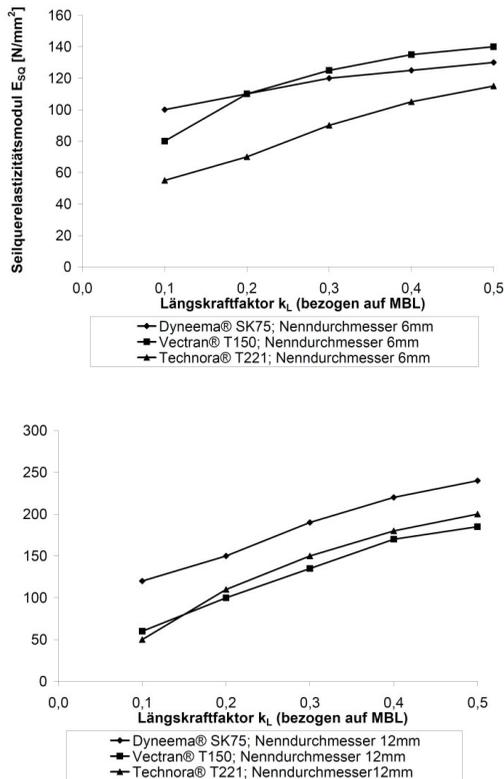


Abbildung 3: Seilquerelastizitätsmodul  $E_{SQ}$  für verschiedene Fasermaterialien, 6mm und 12mm Nenndurchmesser in Abhängigkeit von  $k_L$ ;  $k_Q = 0,1$ ; 1. Lage

Die Abbildungen zeigen bei beiden Durchmesserderivate der geprüften Faserseilvarianten einen im Vergleich zum Stahlseil 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 Quermodul unwahrscheinlich – der Erfahrungswert hinsichtlich der Querelastizität zur einwandfreien Wickelbarkeit eines Seiles bzw. Fasergeflechtes legt hierfür einen Mindestwert von ca.  $400 \text{ N/mm}^2$  fest.

### **3 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 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 (Abbildung 4). In der Praxis wurden ähnliche Phänomene beobachtet /3/. 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.

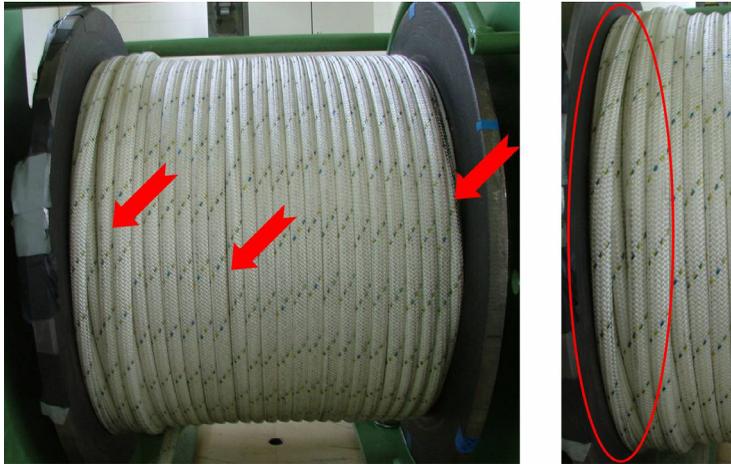
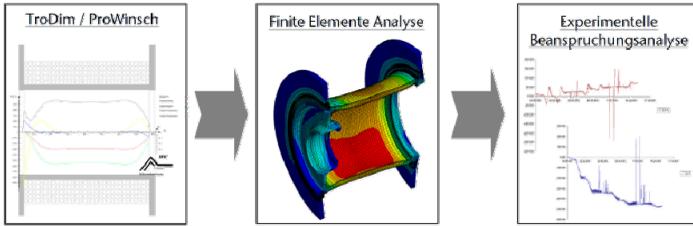


Abbildung 4: Unregelmäßiges Spulbild eines Kern-Mantel-Geflechtes aus DYNEEMA SK 75 Ø 14mm

#### 4 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. An dieser Stelle wird auf die charakteristischen Auswirkungen durch eine mehrlagige Bewicklung mit einem Faserseil eingegangen. Der in Abbildung 5 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 Kunstfaserseil dargestellt werden. 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/mm<sup>2</sup> sowie einen Querelastizitätsmodul von  $E_{SQ}$  von 1600 N/mm<sup>2</sup> auf, das Kunststoffseil wird hingegen durch einen Längselastizitätsmodul  $E_{SL}$  von ca. 39000 N/mm<sup>2</sup> sowie einen Querelastizitätsmodul von  $E_{SQ}$  von 140 N/mm<sup>2</sup> beschrieben.



- Erste Aussagen zum Beanspruchungsszenario des Trommelmantels auf analytischer Grundlage (Spannungen, Dehnungen, etc.)
- Basierend auf Längs- sowie Quersteifigkeit des Zugmittels sowie Geometriedaten des Seilträgers
- Bestimmung von Mantel- sowie Bordscheibenlasten als Eingangsparameter für die numerische Analyse
- Detaillierte numerische Bauteilanalyse der komplexen Trommelgeometrie
- Eingabedaten basierend auf numerischer Grundlage ( TroDim und ProWunsch)
- Festigkeitsnachweis für die realistische Geometrie der Seiltrommel
- Experimentelle Bestimmung der axialen, tangentialen sowie Biegespannungen im Trommelmantel sowie den Bordscheiben
- Möglichkeit zur Verifizierung und somit Absicherung der Vereinfachungen des analytischen Ersatzmodelles sowie der Ergebnisse der numerischen Analyse

Abbildung 5: Vorgehensweise zur Bestimmung des Beanspruchungsszenarios einer Seiltrommel

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

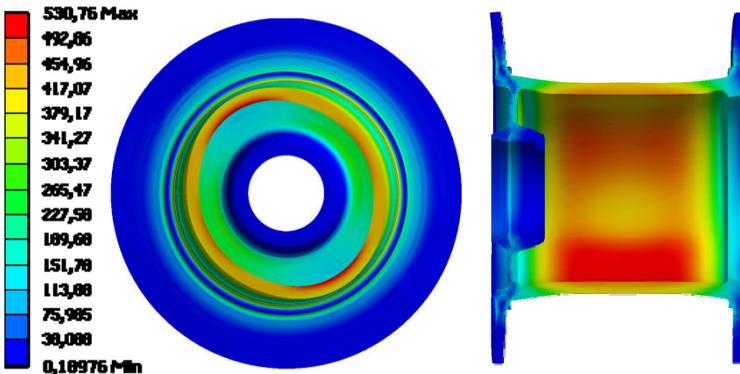


Abbildung 6: Vergleichsspannung nach von Mises in der Trommelstruktur bei Bewicklung mit einem Stahlseil, 6 Lagen,  $E_{SL} = 75000 \text{ N/mm}^2$ ;  $E_{SQ} = 1600 \text{ N/mm}^2$ , Vergrößerungsfaktor = 44

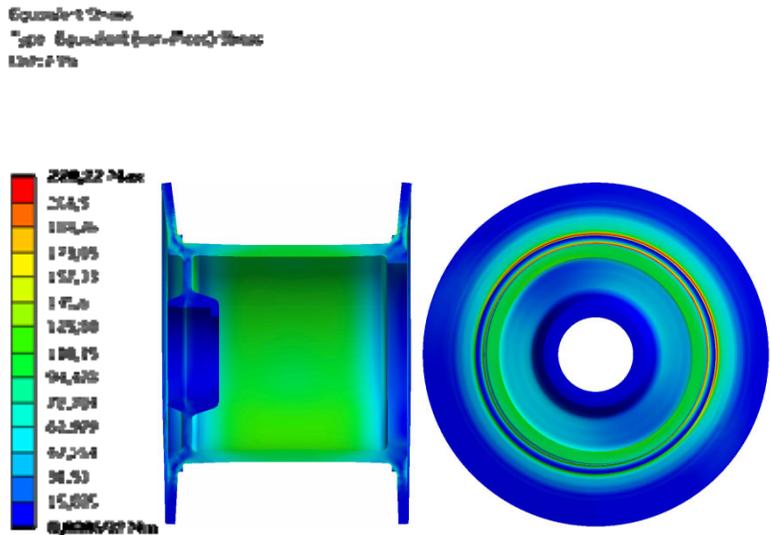


Abbildung 7: Vergleichsspannung nach von Mises in der Trommelstruktur bei Bewicklung mit einem Kunststoffseil, 6 Lagen,  $E_{SL} = 39000 \text{ N/mm}^2$ ;  $E_{SQ} = 140 \text{ N/mm}^2$ , Vergrößerungsfaktor = 44

Der resultierende Beanspruchungszustand in beiden Fällen, beschrieben durch die Vergleichsspannung nach v. Mises, ist in Abbildung 6 sowie 7 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 6) ein Vergleichsspannungsmaximum in Höhe von ca.  $530 \text{ N/mm}^2$  sowie deutliche, unsymmetrische Verformungen im Trommelmantel. Charakteristische Bereiche des Trommelmantels, bedingt durch einen unsymmetrischen Belastungszustand aufgrund des LEBUS®-Rillungssystems, stellen in diesem Szenario eindeutig die höchstbeanspruchte Stelle des Bauteils dar.

Gänzlich anders gestaltet sich hingegen das Beanspruchungsszenario im Zuge der Bewicklung mit einem Kunstfaserseil (vgl. Abbildung 7): aufgrund der geringen Quersteifigkeit des Fasergeflechtes verringert sich die Belastung des Trommelmantels immens, unsymmetrische Verformungen im Vergleich zu Abbildung 6 sind auf ein Minimum reduziert. Ein Vergleichsspannungsmaximum in Höhe von lediglich ca.  $220 \text{ N/mm}^2$  wird nunmehr nicht im Trommelmantel, vielmehr im Übergangsbereich 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 teilweise entspannen können, andererseits neue Fragen aufwerfen bzw. Gestaltungsmöglichkeiten des Gesamtsystems Seil-Seiltrommel eröffnen.

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**

Drahtseile sind aus dem heutigen Alltag nicht mehr wegzudenken. Diesen Erfolg hätte sich der Clausthale Oberbergrat 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. 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.

Erhöhte Anforderungen, neue Materialien sowie Produktionsverfahren verlangen demnach innovative Lösungen für das "alte" Maschi-

nenelement-Seil und Seil-Trommel für wichtige Transportaufgaben auch in der heutigen Zeit.

Vor diesem Hintergrund konnte in diesem Jahr am Institut ein weiteres Forschungsvorhaben akquiriert werden. Das als Verbundprojekt gestaltete Vorhaben wurde in Zusammenarbeit mit der TU Chemnitz initiiert, das Konsortium besteht neben den beiden Forschungseinrichtungen aus insgesamt vier mittelständischen Unternehmen sowie einem assoziierten Partner. Wesentliche Zielsetzungen bestehen in der Bestimmung des Einflusses der Faserseilbewicklung auf das System Seil-Seiltrommel, der Gewinnung von Erkenntnissen zur Erweiterung der bestehenden Dimensionierungsgrundlage hinsichtlich des Einsatzes von synthetischen Faserseilen sowie der Identifikation einer zielführenden Seil- wie auch Trommelgestaltung für Windensysteme mit synthetischen Faserseilen zugunsten einer beanspruchungsgerechten Seil- wie auch Seiltrommeldimensionierung.

## **6        Literatur**

- /1/ 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.
- /2/ Leng, M.; Stahr, K.; Wächter, M.: Tradition und Zukunft - Aktivitäten in der Seilforschung am Institut für Maschinenwesen, IMW-Institutsmitteilung Nr. 34, 2009
- /3/ Rebel, G., Verreet, R. and Ridge, I.M.L.: Lightweight ropes for lifting applications, Proceedings of the OIPEEC Conference, Athens, 2006.
- /4/ O'Hear, N., Grabandt, O. and Hobbs, R.E.: Synthetic fibre ropes for mine winding, Proceedings of the OIPEEC Conference, Athens, 2006.
- /5/ Smeets, P.J.H.M.: New developments on ropes with Dyneema for running wire applications, 4. FachkolloquiumInnoZug, Chemnitz, 2010.
- /6/ 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.
- /7/ Mercator Media Ltd Damen delivers 'SD Reliable' - An important milestone, Maritime Journal, Hampshire, 2009.