

Vergleich der Beanspruchung einer Faser- und Stahlseilbewickelten Seiltrommel

Stök, M.

Die Belastung auf eine Seiltrommel durch die Bewicklung mit einem Faser- oder Stahlseil unterscheiden sich aufgrund der unterschiedlichen Seileigenschaften. Für eine bestehende Seiltrommel wird untersucht, welchen Einfluss die Verwendung eines Faserseils anstelle eines Stahlseils hat. Viele Faktoren haben einen Einfluss auf die Lasten, sodass für jedes Seiltrommelsystem eine individuelle Betrachtung notwendig ist.



The drum load caused by a fibre or steel rope differs due to different properties. To examine the influence of the different ropes on an existing construction the stress caused by the winding pack are compared and evaluated. Many contradicting influences to the drum load necessitate an individual consideration for each rope drum system.

Einleitung

Die Eigenschaften von Stahl- und Faserseilen unterscheiden sich voneinander. Die Vorteile des Faserseils sind nach Schwarzer /1/ die hohen ertragbaren Biege- wechselzahlen, das geringe spezifische Gewicht und die damit verbundene Hand- lichkeit. Nachteile sind die großen Dehnungen von teilweise über 50% und die damit verbundene Brucharbeit, sowie eine Empfindlichkeit gegenüber UV-Strahlung, Wasser und Chemikalien. Die Empfindlichkeiten können durch geeignete Beschichtung vermieden werden.

Für die Belastung einer Seiltrommel sind die Seilzugkraft, der Längs- und Querelastizitätsmodul sowie die Reibwerte im Kontakt Seil - Seil und Seil – Trommel entscheidend. Insbesondere die sehr unterschiedlichen Querelastizitätsmodule führen zu gegenteiligen Lasten. Früher wurde deshalb davor gewarnt bestehende Trommelkonstruktionen, die für Stahlseile ausgelegt sind, mit einem Faserseil zu bewickeln, z.B. /2/. Inzwischen ist insbesondere die Erforschung von Faserseilen weiter vorangeschritten, sodass für jede Seiltrommel individuell geprüft werden sollte, ob eine Bewicklung mit dem jeweils anderen Seil möglich ist.

Die Belastung der Seiltrommel

Durch das Seilpaket wirken Axialkräfte auf die Bordscheiben und ein Druck auf den Trommelmantel, wie in Abbildung 1 zu sehen ist. Die analytische Berechnung der Belastung einer Seiltrommel bei ein- und mehrlagigen Bewicklung ist bereits von verschiedenen Autoren, wie /2,3,4/, beschrieben worden.

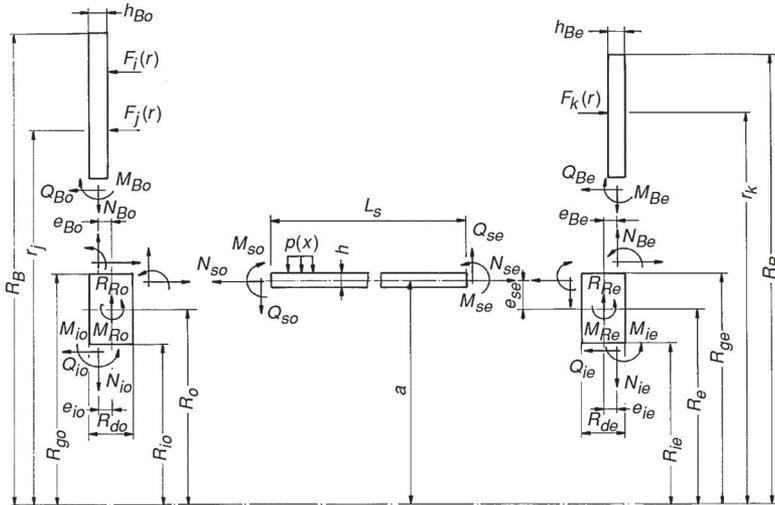


Abbildung 1: Das mechanische Ersatzschaltbild einer Seiltrommel /4/

Dietz /3/ beschrieb erstmals einen Entlastungseffekt. Dabei verformt jede Umschlingung den Trommelmantel in radialer Richtung. Da die Absenkung des Trommelmantels nicht lokal auf das Abmaß des Seils beschränkt ist, kommt es auch zu einer Absenkung des Trommelmantels im Bereich der Nachbarwindung. Durch die zusätzliche Absenkung des Trommelmantels sinkt die Spannung im bereits aufgewickelten Seil und damit der Druck auf die Seiltrommel.

Der zweite Entlastungseffekt tritt bei der Mehrlagenwicklung auf. Die zusätzlichen Lagen führen zu einer weiteren Belastung und Absenkung des Trommelmantels. Wie bereits beim Entlastungseffekt der einlagig bewickelten Seiltrommel für die Nachbarwindung gezeigt wurde, nimmt nun die Vorspannung in der unteren Lage ab und damit der von ihr erzeugte Druck. Hinzu kommt das die Quersteifigkeit von Seilen erheblich geringer als ihre Längsteifigkeit oder der Steifigkeit des Trommelmantels ist. Der Seilquerschnitt der unteren Lage wird durch die Last der oberen Lage deformiert. Der mittlere Seildurchmesser nimmt ab, was eine Spannungsminde- rung zur Folge hat. Durch die Entlastungseffekte nimmt der Druck auf den Mantel der Seiltrommel nicht proportional mit der Windungs- und Lagenanzahl zu.

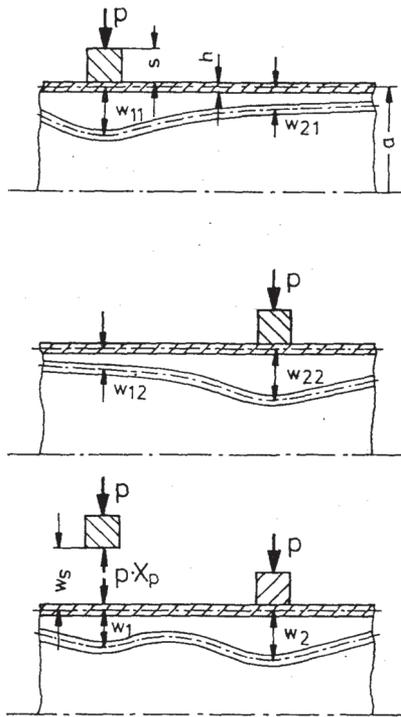


Abbildung 2: Der Entlastungseffekt einer einlagig bewickelten Seiltrommel /3/

Die unsymmetrische Verformung des Trommelmantels bei einer Seiltrommel mit Lebusrillung thematisierte Mupende /4/ erstmals. Er zeigt, dass dies mit unterschiedlichen Drücken im Parallel- und Kreuzungsbereich zusammenhängt. Diese resultieren aus abweichenden Wickelradien im Seilpaket. Im Kreuzungsbereich liegen die Seillagen alle übereinander, während sie in den Parallelbereichen in den Lücken der unteren Lage liegen. Der Druck ist dadurch im Parallelbereich größer als im Kreuzungsbereich.

Für die Lebus-Rillung berechnete Mupende /4/ die axialen Kräfte auf die Bordscheiben getrennt für den Parallel- und Kreuzungsbereich. Die Last vom Seil auf die Bordscheibe während des Aufstiegs in die nächste Lage ist nicht konstant. Mit zunehmendem Keilwinkel α steigt diese bis zu ihrem Maximum beim Winkel α_0 an. Dies ist in Abbildung 3 dargestellt.

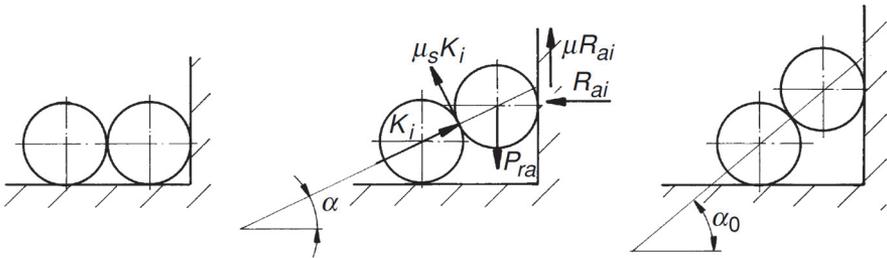


Abbildung 3: Die auf die Bordscheibe wirkende axiale Last R_{ai} /4/

Der Querelastizitätsmodul von Faserseilen ist erheblich geringer als der von Stahlseilen. Henschel /2/ stellte fest, dass bei Seilen mit einer hohen Querkompression, also einem geringen Querelastizitätsmodul, die Last auf die Bordscheiben steigt. Mupende /4/ stellte für Stahlseile ebenfalls fest, dass Seile mit einem niedrigen Querelastizitätsmodul den Trommelmantel geringer und die Bordscheiben höher belasten. Bei Seilen mit einem hohen Querelastizitätsmodul ist es andersrum, der Trommelmantel wird hoch und die Bordscheiben gering belastet.

Durch den geringen Querelastizitätsmodul fällt die Ovalisierung des Faserseils bei einer Bewicklung unter Last erheblich größer aus als bei einem Stahlseil, vgl. Abbildung 4. Dies führt zu einem kompakteren Seilpaket mit einem geringeren Radius der Seillagen, wie in Abbildung 5 dargestellt. Die Kraft der sich abstützenden Seile auf die Bordscheibe nimmt dadurch zu. Jedoch sinken der Radius des Kraftangriffspunktes und durch die Entlastungseffekte der Druck auf den Trommelmantel. /5/

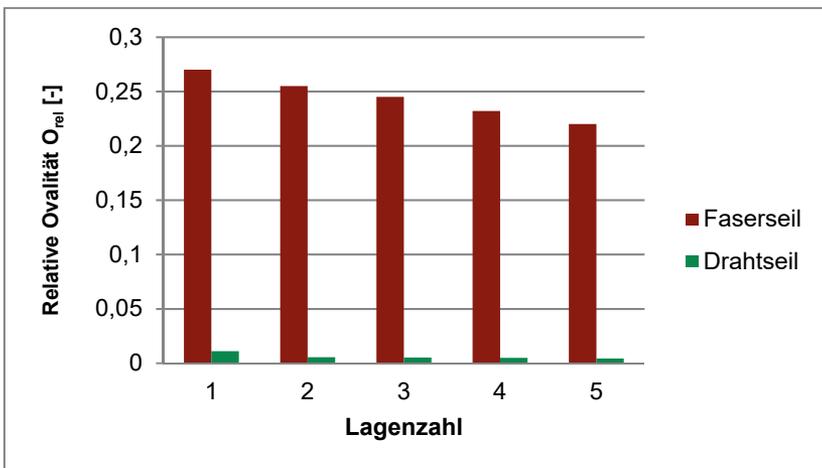


Abbildung 4: Die Unterschiede in der Ovalisierung von Faser- und Stahlseilen /5/

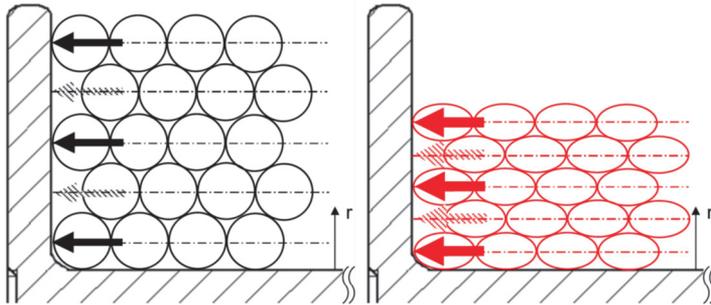


Abbildung 5: Die unterschiedlichen Seilpakete mit einem Stahlseil links und einem Faserseil rechts /5/

Da der Reibwert einen Einfluss auf die Bordscheibenlasten hat, sind in /5/ die Reibwerte für Faserseile untersucht worden. Dies umfasst sowohl den Kontakt für die Seile untereinander, als auch der Seile mit der Seiltrommel. Bei der Reibwertermittlung für die Faserseile ist die Längsspannung der Seile verändert worden, da auch diese einen Einfluss auf den Reibwert hat. Die Ergebnisse sind in Abbildung 6 zu sehen.

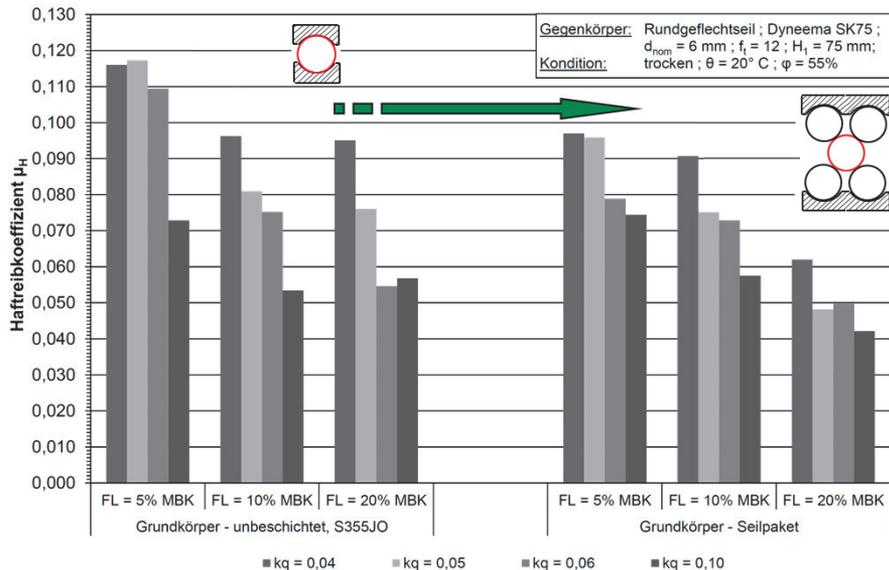


Abbildung 6: Die Reibwerte von Faserseilen unter verschiedenen Längsspannungen im Kontakt mit der Seiltrommel (links) oder mit anderen Seilen (rechts) /5/

Vergleich zwischen einer Faser- und Stahlseilbewickelten Seiltrommel

Die Seiltrommel wird mit den analytisch berechneten Lasten für eine Stahl- und Faserseilbewicklung belastet. Es wurden dabei folgende Randbedingungen verwendet:

- identische Seilzugkraft für beide Seile
- sechslagige Bewicklung
- Längselastizitätsmodul E_{sL}
 - Faserseil: 61,97 GPa
 - Stahlseil: 91 GPa
- Querelastizitätsmodul E_{sQ}
 - Faserseil: 311 MPa
 - Stahlseil: 1963 MPa
- Reibwerte
 - Faserseil: 0,05
 - Stahlseil: 0,18

Daraus ergeben sich unterschiedliche Belastungen für die Seiltrommel. Die Trommelmanteldrücke sind in Abbildung 7 dargestellt. Dabei wurde der Trommelmanteldruck auf den geringsten Druck normiert um die Verhältnisse leichter erfassen zu können.

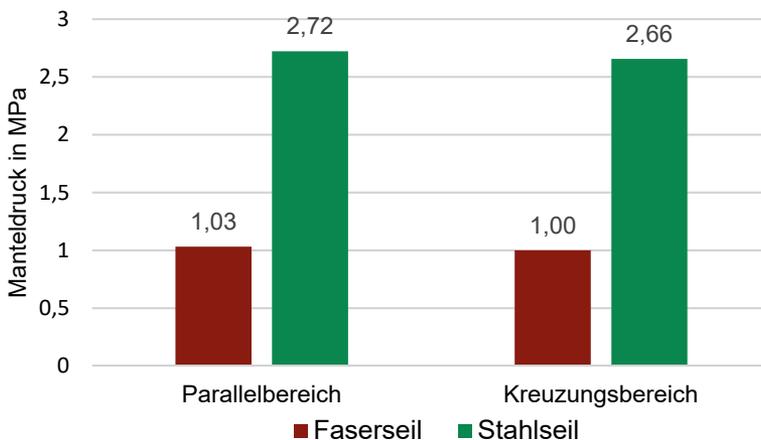


Abbildung 7: Die normierten Trommelmanteldrücke für die Vergleich der Faser- und Stahlseilbewicklung

Die Axialkräfte für jede Lage des Seilpaketes sind bei dem Stahl und Faserseil unterschiedlich. Der qualitative Verlauf ist in Abbildung 8 zu sehen. Die gesamte Axialkraft, des Stahlseils ist 1,2% größer als die des Faserseils. Die Aussage, dass die

Bordscheibenlast mit geringerem Querelastizitätsmodul zunimmt, trifft hier nicht zu, da die geringeren Reibwerte des Faserseils die Erhöhung der Axialkraft mindern.

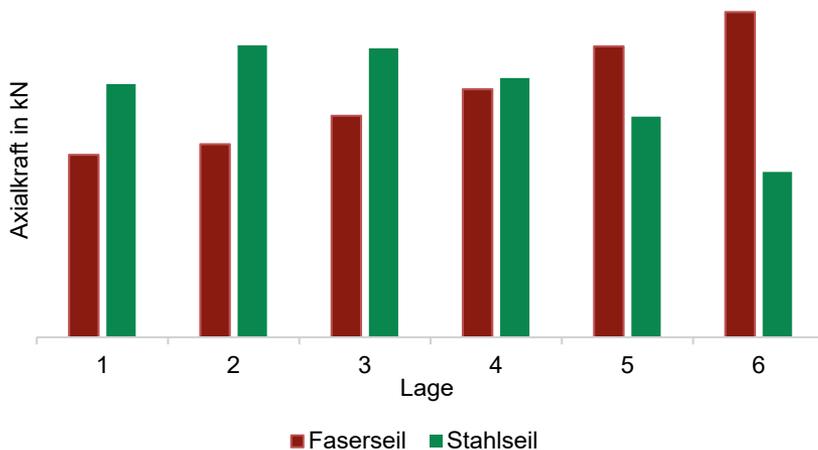


Abbildung 8: Die Axialkräfte für jede Lage des Seilpaketes bei einer Bewicklung mit einem Faser- oder Stahlseil. /7/

Für die Simulation wird ein linearelastisches Materialmodell verwendet. Dies führt dazu, dass die Spannungen in der Seiltrommel bei beiden Seilarten die Fließgrenze erheblich übersteigen. Ausgewertet wurden die Spannungen in dem Trommelmantel und die Spannungen in der Übergangskerbe vom Trommelmantel in die Bordscheibe. Diese sind in Abbildung 9 dargestellt.

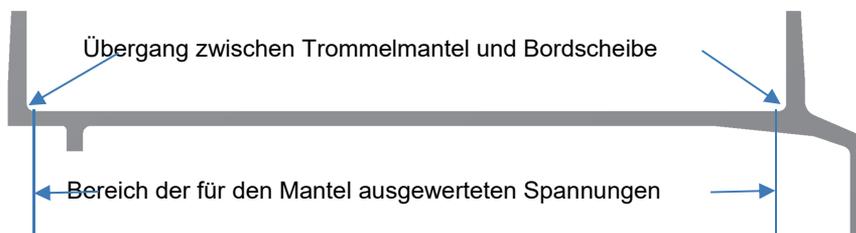


Abbildung 9: Die ausgewerteten Bereiche der Seiltrommel. Abbildung aus /8/

In Abbildung 10 sind die Vergleichsspannungen für die Bewicklung mit beiden Seilmaterialien gegenübergestellt. Um die Spannungsunterschiede schneller erfassen zu können, sind die Spannungen auf die Fließgrenze normiert worden.

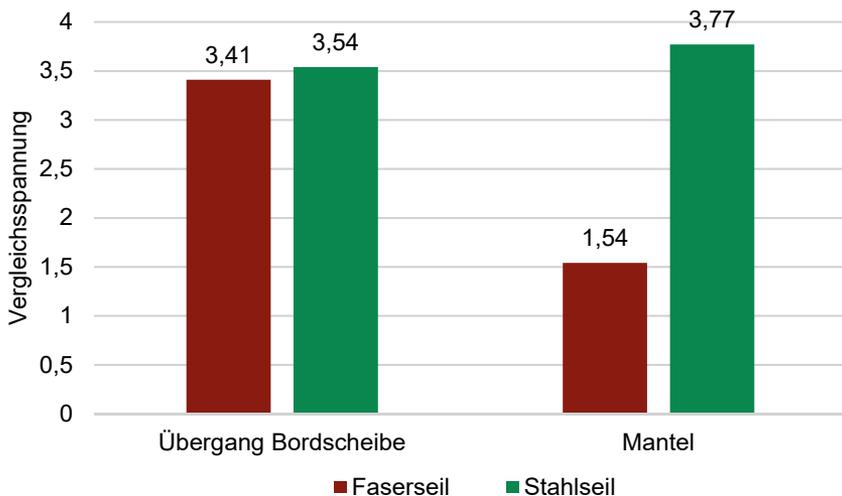


Abbildung 10: Die in der Seiltrommel auftretenden und auf die Fließgrenze normierten maximalen Vergleichsspannungen //7/

Bei der faserseilbewickelten Seiltrommel tritt die höchste Spannung mit dem 3,41-fachen der Fließgrenze am Übergang zwischen der Bordscheibe und dem Trommelmantel auf. Die Beanspruchung im Trommelmantel ist auf der Innenseite mit dem 1,54-fachen der Fließgrenze am höchsten.

Bei der Bewicklung mit einem Stahlseil sind die Spannungen im Übergang zwischen der Bordscheibe und dem Trommelmantel mit dem 3,54-fachen der Fließgrenze annähernd identisch mit den Beanspruchungen durch das Faserseil. Aufgrund des erheblich höheren Drucks vom Seilpaket auf den Trommelmantel sind die Spannungen mit dem 3,77-fachen der Fließgrenze im Trommelmantel jedoch erheblich höher als mit einem Faserseil.

Zu erklären ist der erhebliche Unterschied zwischen den beiden Beanspruchungen durch den Einfluss des Verhältnisses aus der Längs- zur Quersteifigkeit des Seils. Das Verhältnis E_{sl}/E_{sq} beträgt für das Faserseil 200 und für das Stahlseil 46. In Abbildung 11 ist für verschiedene Verhältnisse und Lagenanzahlen dargestellt, wie sich die Spannungen relativ zur einlagig bewickelten Seiltrommel verhalten. Während bei einem Verhältnis von 200 die Spannungen sich bis zur sechsten Lage nicht einmal verdoppeln, steigt es bei einem Verhältnis von 46 um ca. 4,5. So kommt es bei dem Stahlseil, trotz der selben Seilzugkräfte und ähnlichen Spannungen in der ersten Lage zu einer erheblich höheren Belastung und Beanspruchung im Trommelmantel bei der sechslagigen Bewicklung.

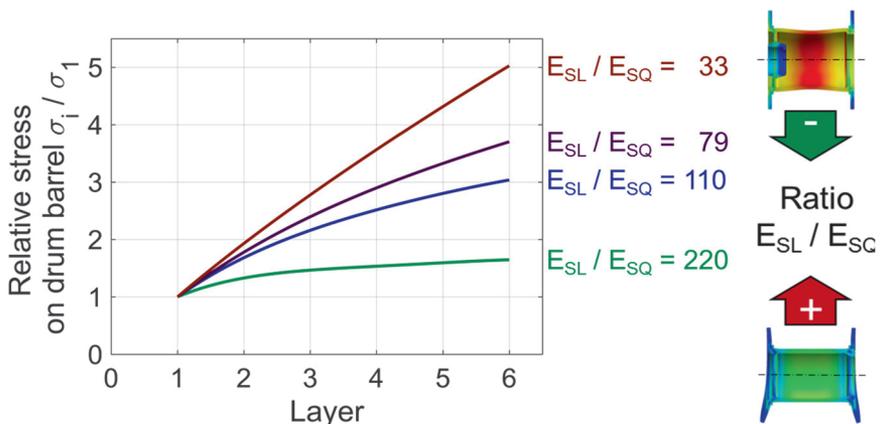


Abbildung 11: Der Einfluss des Steifigkeitsverhältnisses auf die Spannung im Trommelmantel /6/

Die für die Berechnung angenommenen Seil und Trommelparameter sind nur beispielhaft gewählt und müssen keinem im realen Einsatz befindlichem System entsprechen. Die Parameter bewegen sich jedoch im üblichen Rahmen für Stahl- und Faserseile.

Aufgrund der sehr hohen Spannungen in den Seiltrommeln ist über ein Materialmodell das eine Plastifizierung berücksichtigt nachzudenken. Die Spannungen werden dadurch erheblich geringer ausfallen, allerdings wird die Verformung zunehmen. Eine größere Verformung führt aufgrund der Entlastungseffekte zu geringeren Lasten. Dies ist in dieser Berechnung nicht berücksichtigt worden. Wie diese hohen Spannungen ertragen werden können ist deshalb Gegenstand weiterer Untersuchungen.

Zusammenfassung

Die Aussage, dass bei einem Faserseil die Bordscheiben höher und der Trommelmantel niedriger belastet werden als bei einem Stahlseil, konnte nicht allgemeingültig bestätigt werden. Im Übergang zwischen der Bordscheibe und dem Trommelmantel ist nur ein geringer Spannungsunterschied, da die gesamte Axialkraft bei beiden Seilen annähernd gleich ist. Der Unterschied wird mit der erheblich höheren Mantelbelastung beim Stahlseil zusammenhängen.

Die Beanspruchung des Trommelmantels durch das Faserseil sind erheblich geringer als die von dem Stahlseil hervorgerufenen. Dies hängt mit dem höheren Verhältnis aus Längs- zu Quersteifigkeit zusammen.

Literatur

- /1/ Schwarzer, T.: Beitrag zur Gestaltung und Dimensionierung von Windentrommeln bei mehrlagiger Bewicklung mit Kunststoff- und Stahlseilen, 2011
- /2/ Henschel, J.: Dimensionierung von Windentrommeln. Düsseldorf: Verlag und Vertriebsgesellschaft mbH, 1999
- /3/ Dietz, P.: Ein Verfahren zur Berechnung ein- und mehrlagig Bewickelter Seiltrommeln. Düsseldorf: VDI-Verlag GmbH, 1972
- /4/ Mupende, I.: Beanspruchungs- und Verformungsverhalten des Systems Trommelmantel – Bordscheiben bei mehrlagiger Bewicklung und elastischen und teilplastischem Werkstoffverhalten. Göttingen: Culviller Verlag, 2001
- /5/ Lohrengel, A.; Stahr, K.; Schulze, M.; Wächter, M.: Innovative drum construction for multilayer winding with fibre ropes; Proceedings of the OIPEEC Conference 2015, Dr. I.M.L. Ridge, Stuttgart, ISBN: 978-0-9552500-5-7.
- /6/ Lohrengel, A.; Stahr, K.; Schulze, M.; Wächter, M.: Finite element analysis of wire rope stiffness; Proceedings of the OIPEEC Conference 2019
- /7/ Stök, M.: Untersuchung des Einflusses verschiedener Seile und Seilparameter auf die Beanspruchung einer Seiltrommel, unveröffentlichte Masterarbeit, TU-Clausthal, 2019
- /8/ Stök, M.: Vergleich von Beanspruchung und Verformung einer Windentrommel mit und ohne Rillung mit Hilfe eines 2D Finite Elemente-Modells, unveröffentlichte Bachelorarbeit, TU-Clausthal, 2017