

Innovatives Wickelsystem für Faserseile

Schulze, M.; Wächter M.



Aufgrund von Vorteilen von Faser- gegenüber Drahtseilen wie reduziertes Längengewicht, Korrosionsbeständigkeit und Umweltschonung kommen diese in der Praxis verstärkt zum Einsatz. Ziel des durch die AiF geförderten Projektes /1/ war es, dem Problem des Fehlens von Einsatzrichtlinien und Dimensionierungsgrundlagen zu begegnen. Dazu wurden Versuche zu Seileigenschaften und Eigenschaften im Zusammenspiel Seil – Trommel durchgeführt. Weiterhin gab es Wickelversuche zur Ermittlung der Beanspruchung der Trommel und zur Beurteilung der Wickelqualität. Abschließend wurde auf Grundlage der gewonnenen Erkenntnisse eine angepasste Trommelkonstruktion entwickelt.

The use of high-strength fibre ropes in practice increases lately, due to their reduced length mass, resistance against corrosion and their environmental compatibility compared to wire ropes. The aim of the project funded by the AiF /1/ was to develop adequate application directives and dimensioning basics. Therefore experiments were carried out to examine rope characteristics and interactions between rope and drum. Furthermore winding tests were performed to evaluate the drum load and the winding pack. Based on these results an optimized drum construction was developed.

Einleitung

Das Faserseil bietet aufgrund seiner im Vergleich zum Drahtseil anderen Eigenschaften Potentiale in der Fördertechnik. Dazu zählen das geringere Längengewicht und damit eine einfachere Handhabung. Auf der anderen Seite ergeben sich z.B. durch den weichen Aufbau der Faserseile auch Herausforderungen an die Spulbarkeit.

Ziel des durch die AiF geförderten Verbundprojektes „Innovatives Wickelsystem für Seile aus Synthesefasern“ war es, in Zusammenarbeit mit den Partnern Lippmann German Ropes, CL Maschinenbau, tul-tec, Kleinholz-Ruhrort, Hatlapa und der Professur Fördertechnik der TU Chemnitz die Potentiale der Faserseile auch in der Mehrlagenwicklung nutzbar zu machen. Das Institut für Maschinenwesen (IMW) hat dabei das Teilprojekt: „Gestaltung und Dimensionierung mehrlagig bewickelter Seiltrommeln mit Seilen aus Hochleistungs-Synthesefasern“ bearbeitet. Hier ging es zum einen darum, eine sicherheits-

gerechte Trommelauslegung auf Grundlage von zu ermittelnden Seileigenschaften zu gewährleisten. Zum anderen ging es darum, ein geordnetes Wickelbild sicherzustellen, um eine zufriedenstellende Seillebensdauer zu ermöglichen.

Durchgeführte Versuche

Im Rahmen des Projektes wurden Versuche zu wichtigen Kennwerten des Seils wie Querelastizität, Haftreibwert und Spulverhalten durchgeführt. Dabei wurde bei allen Versuchen sichergestellt, dass realitätsnahe Verhältnisse im Zusammenspiel zwischen Seil und Trommel gegeben waren. In Bezug auf die Querelastizität wird das Verhältnis von Trommeldurchmesser (D) zu Seildurchmesser (d), das D/d Verhältnis, im Folgenden durch das Spannungsverhältnis k_q (Formel 1) beschrieben, berücksichtigt. Für den Haftreibwert findet ebenfalls das D/d Verhältnis und damit das Verhältnis aus Längs- und Querkraft bzw. –spannung Berücksichtigung. Zudem werden die unterschiedlichen Kontaktsituationen Seil – Seiltrommel und Seil – Seil in den Reibwertversuchen abgebildet. Die Spulversuche bilden schon durch den Versuchsaufbau an sich das Zusammenspiel Seil – Trommel ab. Zudem wurden in diesem Bereich verschiedene Trommelvarianten eingesetzt, um den Ist-Zustand des mehrlagigen Spulens von Faserseilen abzubilden.

Untersuchung der Querelastizität

Wie schon erwähnt ist es für die Ermittlung der Querelastizität wichtig, realitätsnahe Versuchsbedingungen in Form einer Längskraft im Seil sicherzustellen /2/. Dies spiegelt sich im Spannungsverhältnis wieder:

$$k_Q = \frac{\sigma_{quer}}{\sigma_{längs}} = 0,04...0,06 \quad [-] \quad 1$$

Da das k_Q unter Vereinfachungen dem Kehrwert des D/d Verhältnisses entspricht, kann so die Querelastizität entsprechend des Einsatzfalls ermittelt werden.

Am Querelastizitätsprüfstand des IMW wird zuerst eine Längskraft auf das Seil aufgebracht und beibehalten. Die Längskraft wird in Abhängigkeit von der Mindestbruchlast (MBL) des Seiles gewählt. Anschließend wird das Seil mit Hilfe eines Hydraulikzylinders mit der Querkraft beaufschlagt (Abbildung 1 links). Aus der Messung von Querkraft und Verformungsweg kann anschließend die Querelastizität ermittelt werden (Abbildung 1 rechts).

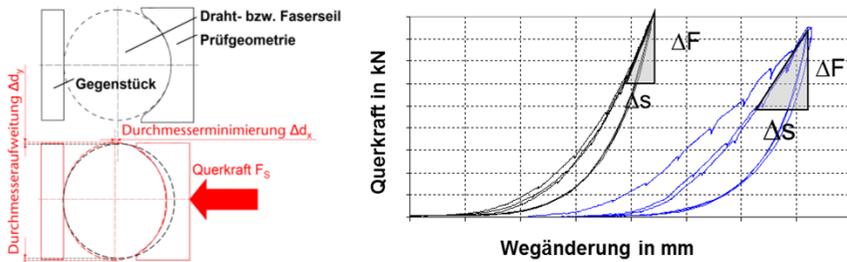


Abbildung 1: Querelastizitätsmessung von Seilen im Querschnitt (links) Ergebnis der Messung (rechts)

Unter anderem wurden vergleichende Versuche mit unterschiedlichen Fasermaterialien durchgeführt. Dazu wurden 12-litzige Rundgeflechte (Kreuzschlag ohne Mantel) aus den Materialien Dyneema® SK75, Vectran® T150 und Technora® T221 mit einem Durchmesser von 12 mm untersucht. In Abbildung 2 sind Ergebnisse für ein konstantes D/d Verhältnis (konstantes $k_Q = 0,1$) unter Variation des Längskraftfaktors k_L dargestellt.

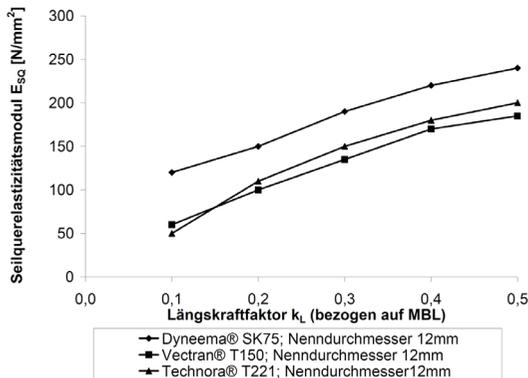


Abbildung 2: Querelastizitäten E_{SQ} für unterschiedliche Fasermaterialien in Abhängigkeit des Längskraftfaktors k_L bei konstantem $k_Q = 0,1$, Seildurchmesser 12 mm

Es zeigt sich eine in der Regel festzustellende Abhängigkeit der Querelastizität von der Seillängskraft. Bei allen drei Materialvarianten steigt bei zunehmender Seilkraft die Quersteifigkeit des Seils. Im Vergleich der unterschiedlichen Materialien weist das Seil aus Dyneema® SK75 eine höhere Quersteifigkeit zu den beiden anderen Materialien auf. Die Seile aus Vectran® T150 und Technora® T221 zeigen sehr ähnliche Seilquerelastizitäten.

Im Vergleich zu einem Drahtseil mit gleichem Nenndurchmesser zeigen die untersuchten Faserseile eine deutlich geringere Quersteifigkeit ($E_{SQ-Faserseil} \approx 0,1 \cdot E_{SQ-Drahtseil}$). Diese Eigenschaft der Faserseile konnte als ein Grund für die schlechte Spulbarkeit der Faserseile in den Spulversuchen identifiziert werden. Bei ansonsten gleichen Versuchsbedingungen wie z.B. Spulgeschwindigkeit und Seilkraft konnten keine guten Wickelergebnisse beim Einsatz einer Trommel für Stahlseile erzielt werden.

Ermittlung der Seilreibwerte

Um das System aus Seil und Seiltrommel vollständig abbilden zu können, ist sowohl die Kontaktsituation zwischen den einzelnen Umschlingungen des Seils innerhalb des Wickelpaketes als auch die Kontaktsituation zwischen Seil und Seiltrommel von Interesse (Abbildung 3 und Abbildung 4).

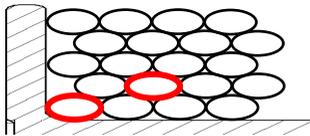


Abbildung 3: Exemplarische Darstellung der Kontaktsituation Seil - Bordscheibe bzw. Mantel und der Kontaktsituation Seil - Seil

Mit Hilfe eines ebenen Versuches wurden beide Kontaktfälle nachgebildet (Abbildung 4 Mitte und rechts). Der Prüfstand ist dazu so ausgelegt, dass die Kraftverhältnisse am Seil entsprechend Formel 1 realitätsnah abgebildet werden können.

Bezüglich der Mehrlagenwicklung hat vor allem der Haftreibwert zwischen Trommel und Seil einen wesentlichen Einfluss auf die Belastung der Bordscheiben. Eine Veränderung des Haftreibkoeffizienten im Bereich von 0,1...0,2 kann je nach Trommelgeometrie zu einer Erhöhung der Bordscheibenlasten von 10...20% führen.

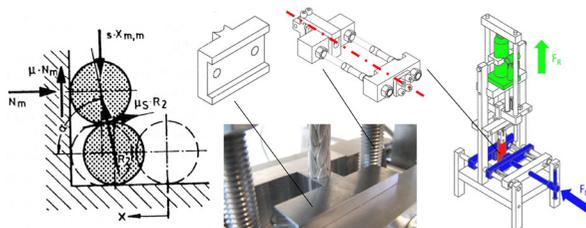


Abbildung 4: Kontaktbereiche nach /2/ (links), ebener Versuch zur Reibwertermittlung (Mitte und rechts)

Im Rahmen des Projektes wurden umfangreiche Versuche mit verschiedenen Faserwerkstoffen, Seilbeschichtungen, verschiedenen Werkstoffen des Gegenkörpers bzw. unterschiedlichen Beschichtungen und unterschiedlichen Umgebungsbedingungen wie beispielsweise mit einem feuchten Seil durchgeführt.

Exemplarisch sollen an dieser Stelle die Ergebnisse mit den unterschiedlichen Kontaktsituationen Seil – Seiltrommel und Seil – Seil dargestellt werden (Abbildung 5). Weiterhin sind Unterschiede in den Einsatzbedingungen zu finden. Der Haftreibwert ist in Abhängigkeit der Seilkraft (FL) bezogen auf die Mindestbruchkraft (MBK) und die Querkraft (kq) dargestellt. Es zeigt sich die Tendenz, dass mit einem größeren Wert für k_q und somit einem kleineren D/d Verhältnis ein niedrigerer Haftreibwert einhergeht. Ebenfalls stellt sich ein kleinerer Reibwert ein, wenn die Seilkraft erhöht wird. Neben dieser Abhängigkeit von den Einsatzbedingungen tritt zudem ein kleinerer Haftreibwert im Kontaktfall Seil – Seil im Vergleich zur Berührung zwischen Seil und Seiltrommel ein.

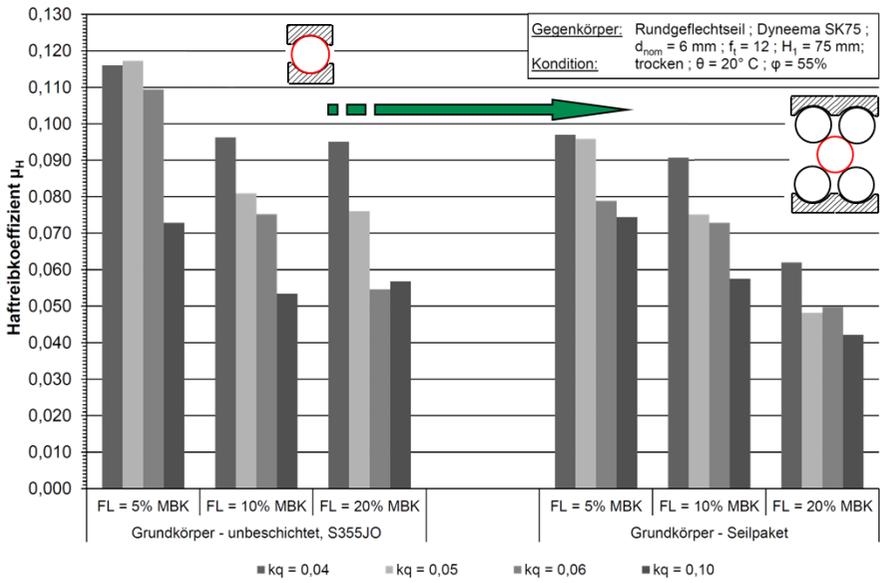


Abbildung 5: Haftreibkoeffizienten Seil – Rille und Seil – Seil

Spulversuche

Die Spulversuche wurden unter zwei verschiedenen Aspekten durchgeführt. Zum einen stand die Belastung der Trommel im Fokus. Dazu wurden vergleichende Versuche mit unterschiedlichen Trommelvarianten sowie mit Draht- und Faserseil durchgeführt. Zum anderen wurden die Verformung des Faserseils und die daraus

resultierende Veränderung des Lagenaufbaus untersucht. Ausgehend davon wurde die Trommelkonstruktion auf die Seileigenschaften abgestimmt.

Die vergleichenden Spulversuche wurden mit Seilen mit einem Nenndurchmesser von 14 mm und vergleichbaren Mindestbruchkräften durchgeführt. Dazu wurden 5 Lagen mit ca. 14% der Mindestbruchkraft auf die Trommel gespult. Die verschiedenen Versuchsaufbauten sind in Abbildung 6 zu sehen.



Abbildung 6: Trommel mit Lebus® Rillung für Drahtseil mit Faserseilbewicklung (Versuch I a), glatte Trommel mit Faserseil (Versuch I b) und Trommel mit Lebus® Rillung mit Drahtseil (Versuch II)

Im Vergleich der Trommelbelastungen zwischen Draht- und Faserseilbewicklung konnten geringere Belastungen durch das Faserseil feststellbar werden. Allerdings war entgegen der Erwartung auf Grundlage des theoretischen Modells in Folge der verminderten Quersteifigkeit die eintretende Verringerung der Belastung weniger stark als erwartet. Es konnte damit eine Abweichung zwischen dem theoretischen Modell und dem Versuch festgestellt werden. Im Bereich der Bordscheiben konnte jedoch die erwartete höhere Belastung gezeigt werden.

Die Abweichung in den Ergebnissen zwischen theoretischem Modell und den Versuchen ist in den im Vergleich zu Drahtseil anderen Eigenschaften des Faserseils zu suchen. Neben den zuvor beschriebenen Eigenschaften Querelastizität und Reibung, konnte ein weiterer wichtiger Parameter mit der Seilverformung identifiziert werden. Bei den untersuchten Seilen zeigte sich diese in einer annähernd ovalen Form. Diese Ovalisierung des Seiles kann durch das Verhältnis der Differenz zwischen dem maximalen und minimalen Einzeldurchmesser zum größten Durchmesser des Seils beschrieben werden (Formel 2):

$$O_{rel} = \frac{d_{max} - d_{min}}{d_{max}} \quad [-] \quad 2$$

Bei den drei genannten Versuchsanordnungen wurde die relative Ovalität der Seile erfasst (Abbildung 7). Beim Drahtseil (Versuch II) zeigte sich dabei eine sehr geringe Ovalität. Das Drahtseil bleibt also nahezu rund. Das Faserseil wird hingegen deutlich oval. Dieser Effekt ist bei der glatten Trommel (Versuch I b) deutlich stärker als bei der Trommel mit Rillung für Drahtseile (Versuch I a) und

zeigt sich besonders ausgeprägt in der 1. Lage. Dies ist durch die unterstützende Wirkung der Rillung zu erklären.

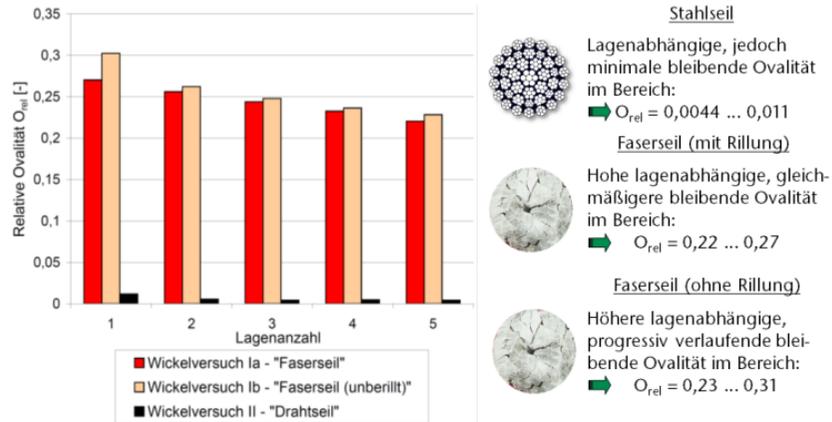


Abbildung 7: Relative Ovalität von Draht- und Faserseil

In direktem Zusammenhang steht die Ovalisierung des Seils mit dem Lagenaufbau. Wie in Abbildung 8 zu sehen ist, hat die Verformung des Faserseils ein deutlich flacheres Wickelpaket im Vergleich zum Drahtseil zur Folge.

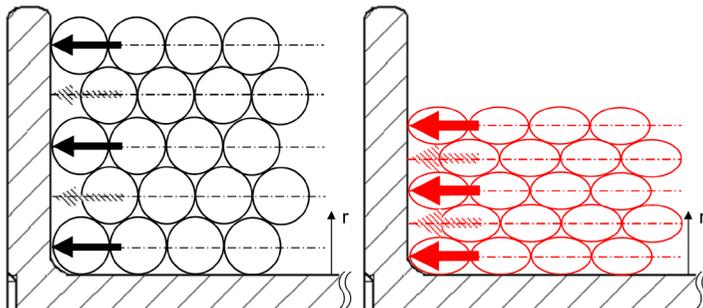


Abbildung 8: Seilpaket Drahtseil (links) und Faserseil (rechts)

Eine wichtige Erkenntnis, die aus den Versuchen zur Ovalität bzw. dem Lagenaufbau gewonnen werden konnte, ist, dass beide Kennwerte nach relativ wenigen Wickelzyklen einem Grenzwert zustreben (Abbildung 9). Während bei der ersten Bewicklung mit einem neuen Faserseil sich noch ein relativ großer Wickelradius (gemessen zur Trommeloberfläche) einstellt, nimmt dieser rasch ab. Ab dem ca. 5. Wickelzyklus kann von einer gleichbleibenden Wickelhöhe gesprochen werden.

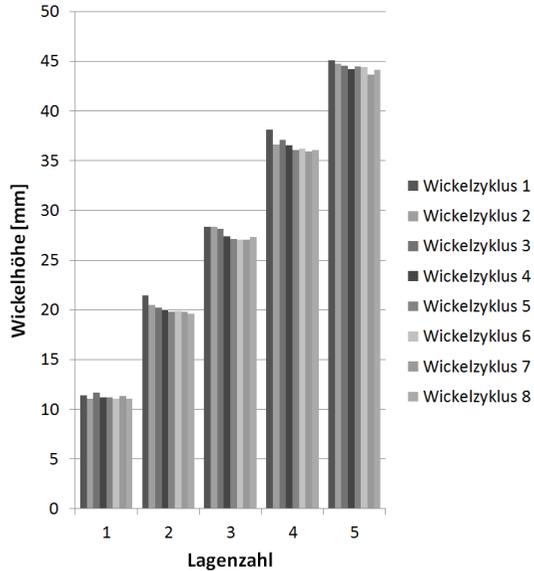


Abbildung 9: Abhängigkeit der Wickelhöhe von der Lage, Veränderung mit der Anzahl der Wickelzyklen

Diese Erkenntnis ist von Bedeutung, da es mit gleichbleibenden Seilquerschnitt und Lagenaufbau möglich wird, die Geometrie der Seiltrommel im Bereich des Trommelmantels (Rillungsquerschnitt) und der Bordscheiben (Auffüllgeometrie) optimal an das Seil anzupassen (vgl. Kapitel *Optimierte Trommelgeometrie*).

Optimierte Trommelgeometrie

Die Notwendigkeit der Anpassung der Trommelgeometrie zeigt sich durch die Unregelmäßigkeiten im Wickelbild bei der Nutzung der Trommel mit gängiger Rillung (Versuch I a) (Abbildung 10).



Abbildung 10: Unregelmäßigkeiten im Wickelbild des Faserseils auf einer Trommel für Drahtseile

Als erste Anpassung wurde die Rillung auf die Ovalisierung des Seils abgestimmt. Diese stützt das Seil nun und zwingt es nicht in eine weitere Verformung, die der Ovalisierung zum Teil entgegenwirken würde.

Zudem wurden die Bordscheiben um Auffüllkeile im Parallelbereich ergänzt (Abbildung 11 links und Mitte). Diese füllen die Lücke zwischen den einzelnen Umschlingungen und der Bordscheibe, die an bestimmten Stellen unvermeidbar sind (Abbildung 11 rechts). Die Notwendigkeit dieser Auffüllkeile ergibt sich aus der geringeren Formstabilität der Faserseile. Die oberen Umschlingungen würden anderenfalls in die vorhandenen Lücken gleiten und zu Unregelmäßigkeiten im Wickelbild führen.

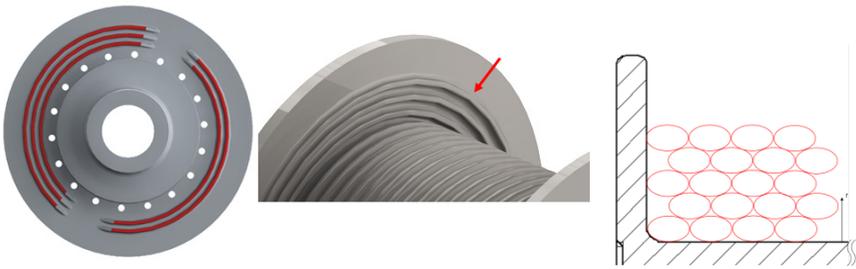


Abbildung 11: Exemplarische Darstellung von Auffüllkeilen an Bordscheiben zur Unterstützung des Wickelpakets (links und Mitte), Schnitt durch das Wickelpaket im Parallelbereich (rechts),

Da durch die Lebus® Rillung ein definierter Kreuzungsbereich gewährleistet wird, müssen die Auffüllkeile in diesem Bereich ein- bzw. ausgeleitet werden. Dies geschieht durch die Ablenkeile (Abbildung 12). Durch sie wird das Seil gleichmäßig im Kreuzungsbereich geführt.



Abbildung 12: Exemplarische Darstellung notwendiger Übergangsgeometrien zwischen Parallel und Kreuzungsbereich

Durch die Stützwirkung, die durch die Veränderungen der Trommeloberfläche erzielt wird, kann ein sauberes Wickelbild gewährleistet werden (Abbildung 13). Die Schwierigkeit besteht allerdings in der Kenntnis bzw. der konstruktiven Umsetzung der genannten Parameter, um das gezeigte Wickelbild zu erzielen.

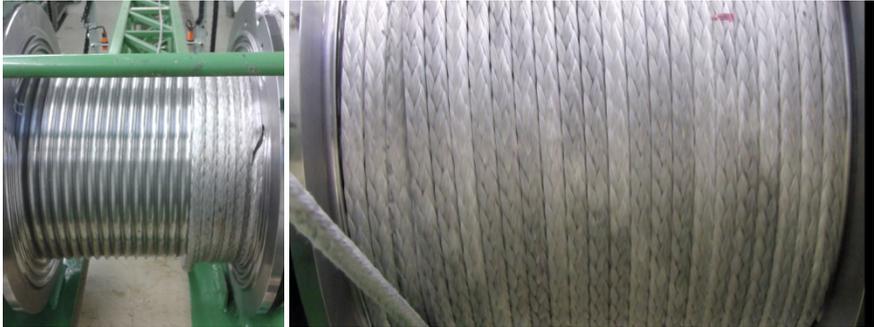


Abbildung 13: Optimierte Trommel (Versuch III), Ergebnis Wickelbild mit speziell für das Faserseil angepasster Oberflächengestaltung (vgl. Abbildung 10)

Feldversuch Bergwerk Rammelsberg

Ergänzend zu den Versuchen auf dem Wickelprüfstand des IMW wurde im Rammelsberg Goslar (Forschungsbergwerk der TU Clausthal) ein Feldversuch durchgeführt. Dazu wurde an einem Versorgungsschacht mit einer Teufe von ca. 33 m eine bestehende pneumatisch angetriebene Winde (Abbildung 14) um die entwickelten Geometrien ergänzt. Mit Hilfe des Rapid Prototyping Verfahrens Fused Deposition Modelling wurden entsprechende Auflagen erstellt, die auf der Außenseite die Trommelabmessungen aufwiesen und auf der Innenseite die beschriebenen geometrischen Anpassungen (Abbildung 15 links).

Neben den Pumpen mit einer Masse von je ca. 400 kg befindet sich in dem Schacht ein Gewicht von 550 kg zum Zweck der TÜV-Abnahme. Mit diesem wurden die Wickelversuche durchgeführt (Abbildung 15 rechts). Somit wurde an dem bestehenden System ausschließlich die Trommeloberfläche verändert und das vorhandene Drahtseil durch ein 7 mm Faserseil ersetzt. Es ergaben sich folgende Versuchsbedingungen:

- 7 mm Dyneema® Faserseil,
- Seilzugkraft von 5,4 kN (ca. 10,5 % der MBK),
- Seilgeschwindigkeit ca. 19 m/min,
- D/d Verhältnis 26,4 entspricht $k_q \approx 0,04$.

Das Wickelbild beim Einsatz der optimierten Trommeloberfläche zeigte im Vergleich zur glatten Trommel ein deutlich besseres Ergebnis. Es konnte in weiten

Bereichen ein geordnetes Wickelergebnis erzielt werden. Da der Seiltrieb jedoch in weiten Bereichen unverändert zum Einsatz kam, stellte sich im Randbereich der einen Bordscheibe ein weniger gutes Wickelergebnis ein. Dies konnte jedoch auf den vorhandenen Schrägzug des Seiltriebs zurückgeführt werden.

Insgesamt konnte die Eignung des Systems Faserseil – Seiltrommel gezeigt werden. Es bleibt jedoch noch Forschungsbedarf im Bereich der Einsatzbedingungen z.B. geänderte Reibwerte infolge Feuchtigkeit oder Schmutz, Ablenkwinkel, etc., unter denen sich ein vollständig zufriedenstellendes Wickelergebnis erzielen lässt.



Abbildung 14: *Wartungsschacht im Rammelsberg Goslar (Forschungsbergwerk der TU Clausthal)*



Abbildung 15: *Seiltrommel mit faserseilspezifischen Anpassungen und Testgewicht im Schacht*

Zusammenfassung

Im Rahmen des beschriebenen Forschungsprojektes wurden zum einen wichtige Eingangswerte für die Auslegung von mehrlagig mit Faserseilen bewickelte Seiltrommeln ermittelt. Neben den im Vergleich zum Drahtseil andersartigen Eigenschaften der Querelastizität und der Haftreibung wurde vor allem der weitere Parameter der Ovalisierung untersucht. Er beeinflusst maßgeblich den Lagenaufbau und hat somit wesentlichen Einfluss auf die Trommelbelastung.

Zum anderen wurde eine Trommelgeometrie auf Grundlage der genauen Kenntnis der Seilgeometrie entwickelt. Mit Hilfe des Wickelprüfstandes des IMW und durch einen Feldversuch im Bergwerk konnte die Eignung der angepassten Trommelfeingeometrie gezeigt werden.

Literatur

- /1/ Innovatives Wickelsystem für Seile aus Synthesefasern, Abschlussbericht zum durch die AiF geförderten Verbundprojekt, 2015, Förderkennzeichen VP2515317US1 *)
- /2/ Dietz, P.: Ein Verfahren zur Berechnung ein- und mehrlagig bewickelter Seiltrommeln; Dissertation, Technische Hochschule Darmstadt, Darmstadt, 1971

*) Projektbearbeitung bis Oktober 2013 Dipl.-Ing. Konrad Stahr, Gustav Wolf Seil- und Drahtwerke GmbH