

Faserseile auf mehrlagig bewickelten Seiltrommeln

Schulze, M.; Wächter, M.

Der vorliegende Artikel stellt die experimentelle Analyse und einen Ansatz zur theoretischen Berechnung des Wickelpaketes von mehrlagig bewickelten Seiltrommeln vor. Dabei wird auf Übereinstimmungen und Abweichungen zwischen Experiment und Theorie eingegangen und aufgezeigt wie die Ergebnisse praktische Anwendung finden können.



This article presents the experimental analysis and an approach for the theoretical calculation of the winding package of multilayer wound rope drums. It deals with similarities and deviations between experiment and theory and shows how the results can be applied in practice.

Einleitung

Moderne Hochleistungs-Faserseile werden aufgrund der Forderung nach großen Seillängen und Leichtbau verstärkt in der Mehrlagenwicklung eingesetzt. Dabei zeigen sich im Vergleich zu Drahtseilen häufig weniger geordnete Wickelbilder. Dies ist nicht gut für die Lebensdauer der Seile. Durch Wickelfehler wie z.B. Wickellücken kann es zum Einschneiden in untere Lagen kommen, die das Seil auf die Dauer schädigen. Im schlimmsten Fall kann dies auch zum Blockieren des Seils und zur Umkehr der Wickelrichtung mit katastrophalen Auswirkungen auf die Standsicherheit eines Krans führen. Zudem führt dies auch zu unklaren Belastungen der Seiltrommel. Die Berechnung der Seiltrommelbelastung beruht auf einem gleichmäßigen Wickeln der Umwicklungen nebeneinander in einer Lage und übereinander in den verschiedenen Lagen. Nur wenn die angenommenen Positionen durch die Umschlingungen auch tatsächlich eingenommen werden, stellt sich das berechnete Belastungsszenario ein.

Eine der Ursachen für das ungeordnete Wickeln ist die Deformation des Seilquerschnitts.

Beschreibung Seiltrommel – Faserseil

Im folgenden Abschnitt werden die Grundlagen der Mehrlagenwicklung, die relevanten Begriffe und das Zusammenspiel zwischen Trommel und Seil

dargestellt. Zur Motivation der Berechnung des Wickelpaketes wird der aktuelle Zustand des Wickelverhaltens gezeigt.

Grundlagen mehrlagige Seiltrommel und Seil

Zur Verdeutlichung der Situation der Umwicklung auf der Seiltrommel sind in Abbildung 1 die Richtungsangaben bezüglich der Trommel dargestellt.

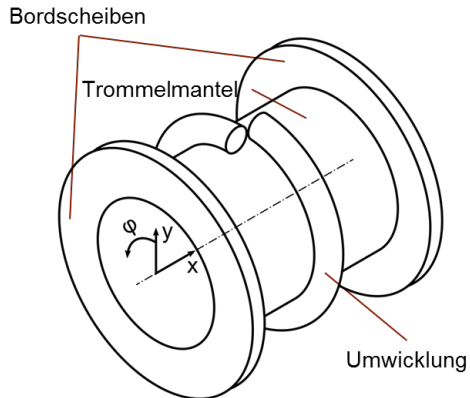


Abbildung 1: Seiltrommel mit Richtungsdefinitionen: x axiale Trommelrichtung, y radiale Trommelrichtung und φ tangentiale Trommelrichtung

Für die Seilführung ist eine Rille auf dem Trommelmantel vorgesehen. Diese führt das Seil in der ersten Lage und ermöglicht auch den folgenden Lagen eine sichere Führung durch die jeweils darunterliegende. Unterschiedliche Bereiche erstrecken sich dabei üblicherweise auf je einem halben Trommelumfang. In den Parallelbereichen wird das Seil parallel zu den Bordscheiben geführt. Durch eine Steigung um einen halben Rillenabstand gelangt das Seil in den Kreuzungsbereichen zum jeweils nächsten Parallelbereich. Die sichere Führung ab der zweiten Lage wird dadurch gegeben, dass sich ein pyramidenartiger Aufbau des Wickelpaketes in den Parallelbereichen ergibt. So liegt die Umwicklung einer höheren Lage immer genau zwischen zwei darunterliegenden (Abbildung 2).

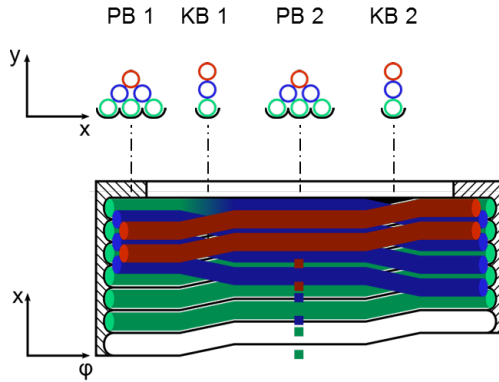


Abbildung 2: Systemrillung (Lebus-Rillung) mit Angabe des Aufbaus des Wickelpaketes in den Parallel- (PB 1 und PB 2) und Kreuzungsbereichen (KB 1 und KB 2)

Durch den beschriebenen definierten Aufbau lässt sich der Wickeldruck jeder Lage und somit auch der Druck auf den Trommelmantel berechnen. Da in der Mehrlagenwicklung auf bereits aufgewickelte Lagen weitere darüber kommen, ergibt sich ein Entlastungseffekt. Durch diesen wird die Seilkraft F_S in bereits auf der Trommel befindlichen Lagen k durch die folgenden reduziert. Insgesamt entsteht dadurch ein geringerer Gesamtdruck als die Summe der Einzeldrücke aller Lagen. Der Entlastungseffekt kann aber nach /1/, /2/ und /3/ wie folgt berechnet werden (Gleichung 1):

$$\Delta F_{sk} = p_r \cdot \sqrt{\frac{\pi \cdot d_{\max} \cdot d_{\min} \cdot f_{\text{real}}}{4}} \cdot \frac{E_{SL}}{E_{SQ}} \cdot A_{\text{real}} \quad 1$$

Der Entlastungseffekt wird durch die folgenden Lagen und damit durch deren Wickeldruck p_r verursacht. Wesentliche Kenngrößen des Seils, die ebenfalls Eingang in die Berechnung finden, sind der reale Querschnitt A_{real} des Seils bzw. der daraus abgeleitete Füllfaktor f_{real} (im vorliegenden Fall der textile Querschnitt). Weiterhin sind die Elastizitäten des Seils zu berücksichtigen. In Seillängsrichtung wird das E-Modul E_{SL} ermittelt. In Seilquerrichtung gilt das davon abweichende E-Modul E_{SQ} . Auf diese vier genannten Größen soll in diesem Artikel nicht weiter eingegangen werden. Weitere Informationen dazu finden sich in anderen Quellen /1/ bis /5/.

Bei den weiteren Größen jedoch ergibt sich aus der Deformation des Seilquerschnitts ein direkter bzw. indirekter Einfluss auf den Entlastungseffekt. Die Querschnittsverformung wird direkt durch den als elliptisch angenommenen Querschnitt berücksichtigt. Dabei gibt d_{\max} den größeren Seildurchmesser in axialer Trommelrichtung und d_{\min} den kleineren in radialer Trommelrichtung an.

Zudem verändert sich durch einen Lagenaufbau mit elliptischen Querschnitten der mittlere Wickeldurchmesser der Umwicklungen um die Trommel r_m (Abbildung 3).

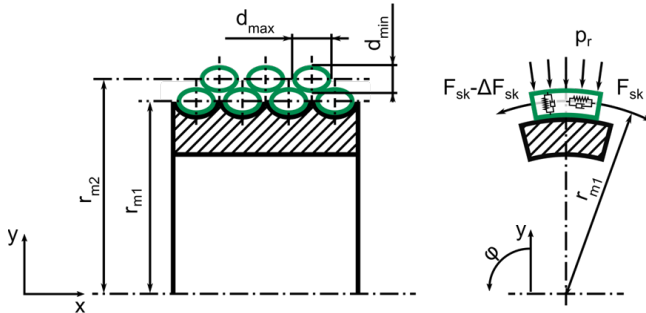


Abbildung 3: Schnitt durch ein Wickelpaket auf einer Seiltrommel mit Angabe der wesentlichen Parameter zur Bestimmung des Entlastungseffekts in der Mehrlagenwicklung

Versuchsaufbau zur Untersuchung des Wickelpaketes

Zur Untersuchung des Wickerverhaltens von Seilen auf mehrlagig bewickelten Seiltrommeln gibt es am Institut für Maschinenwesen der TU Clausthal (IMW) einen Wickelprüfstand. Dieser kann das Seil mit geringer Seilkraft auf der Speichertrommel aufnehmen, da die für den Versuch erforderliche Seilkraft über ein Spill aufgebracht wird. Über eine von der Versuchstrommel entfernte Umlenkscheibe läuft das Seil auf die Trommel auf. Der Abstand zur Umlenkscheibe dient dazu, den Ablenkwinkel, den das Seil zwischen den Bordscheiben durchläuft, in einem zulässigen Rahmen zu halten (Abbildung 4).

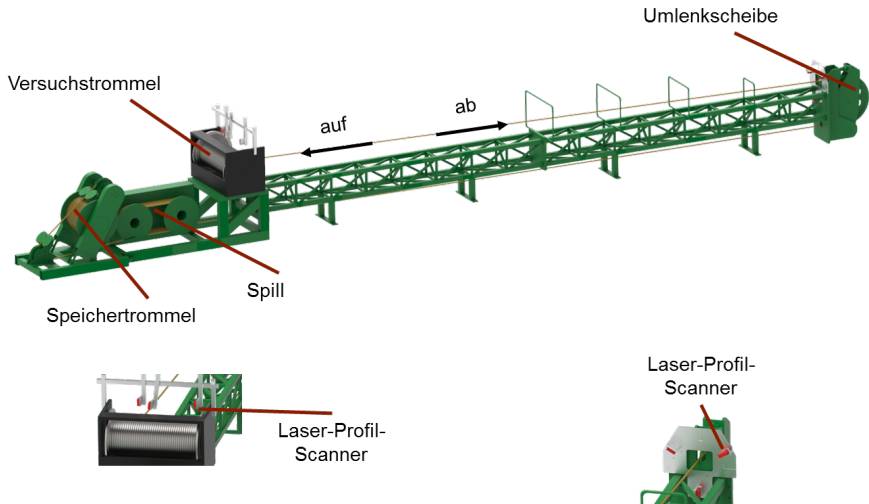


Abbildung 4: Wickelprüfstand mit Laser-Profil-Scannern (oben) zur Untersuchung des Wickelpaketes (unten links) und des Seilquerschnitts (unten rechts)

Über der Versuchstrommel und kurz vor der Umlenkscheibe gibt es Vorrichtungen, um jeweils drei Laser-Profil-Scanner anzubringen. Diese dienen dazu, das Verformungsverhalten des Seils zu untersuchen.

In Abbildung 5 ist die Anordnung der Scanner um das Seil dargestellt. Durch die definierte Anordnung rings um das Seil ist es möglich, einzelne Bilder der Seiloberfläche zu einem Gesamtquerschnitt des deformierten Seils zusammenzusetzen (Abbildung 5, rechts). Mit Hilfe einer Auswertung können daraus die charakteristischen Maße des maximalen und minimalen Durchmessers einer angenäherten Ellipse bestimmt werden. Diese dienen dazu, das deformierte Seil in theoretischen Überlegungen zu beschreiben.

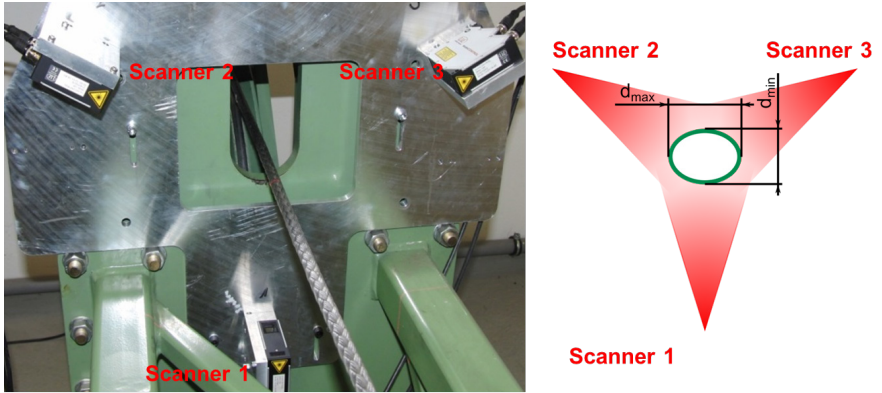


Abbildung 5: Aufbau der Laser-Profil-Scanner zur Untersuchung des Seilquerschnitts (links) und schematischer Aufbau mit Angabe des größten und kleinsten Seildurchmessers (rechts)

Abbildung 6 zeigt den Aufbau der Scanner über der Seiltrommel. In der Ansicht rechts ist dargestellt, wie das Wickelpaket aus einzelnen Bildern der Oberfläche zusammengesetzt werden kann.

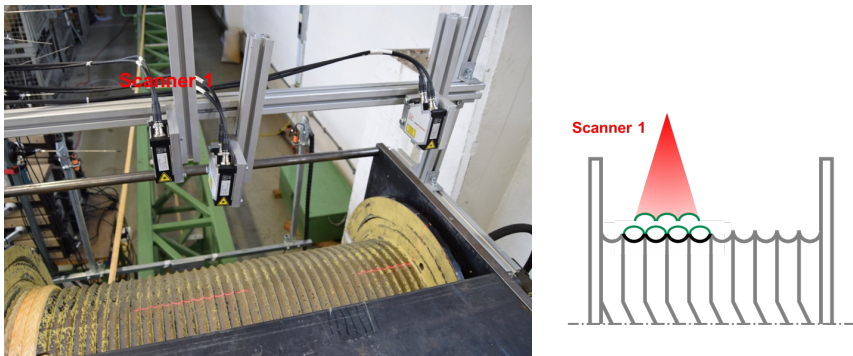


Abbildung 6: Aufbau der Laser-Profil-Scanner zur Untersuchung des Wickelpaketes (links) und schematischer Aufbau mit Angabe eines Schnitts durch das Wickelpaket (rechts)

Ergebnisse von Wickelversuchen

Die vorgestellten Ergebnisse zeigen Versuche an zwei verschiedenen Seilen (Abbildung 7 und Tabelle 1). Es handelt sich um vergleichbare Konstruktionen

von Faserseilen in einer 12-fach geflochtenen Konstruktion. Beide Seile sind aus Dyneema Fasern hergestellt.



Abbildung 7: *Abbildung von Seil 1 (links) und Seil 2 (rechts)*

Der Unterschied zwischen den beiden Seilen ist zum einen ein Kern aus Polyethylen den Seil 1 enthält und zum anderen ein Mantelgeflecht aus Dyneema der ebenfalls Seil 1 umgibt.

Tabelle 1: *Kennwerte der untersuchten Seile*

Nr.	d in mm	Material	Konstruktion	Kern	Mantel
1	22	Daneema SK 75	12-fach Geflecht, thermofixiert	Polyethylen	Dyneema
2	23	Dyneema	12-fach Geflecht, thermofixiert	-	-

Der unterschiedliche Aufbau der Seile zeigt sich deutlich in ihrem unterschiedlichen Deformationsverhalten. In Abbildung 8 ist zu sehen, dass Seil 1 einen annähernd runden Querschnitt am freien Seil nach dem Abspulen aus der Mehrlagenwicklung zeigt. Im Vergleich dazu zeigt die offene Konstruktion von Seil 2 deutlich die einzelnen Litzen. Zudem kann auch deutlich die Deformation zu einem annähernd elliptischen Querschnitt festgestellt werden.

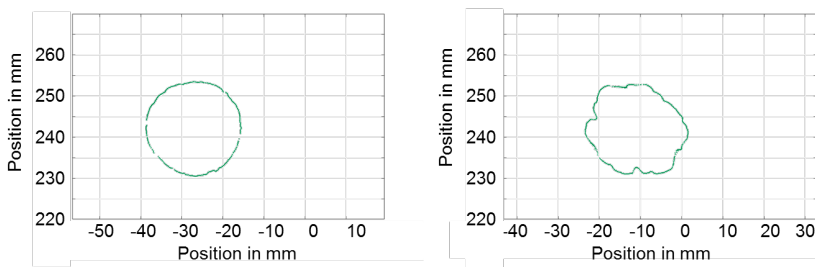


Abbildung 8: *Querschnitte von Seil 1 (links) und Seil 2 (rechts) beim Ablauf von der Trommel*

Dieser unterschiedliche Querschnitt macht sich auch im Wickelpaket bemerkbar. Die Wickelung mit Seil 1 ergibt ein höheres Wickelpaket (Abbildung 9). Dies ist vor allem vor dem Hintergrund bemerkenswert, dass Seil 1 einen kleineren Nenn-durchmesser hat als Seil 2. Weiterhin kann für Seil 1 ein geordneterer Aufbau des Wickelpaketes in diesem Querschnitt festgestellt werden. Es ist der gewünschte pyramidenförmige Aufbau zu sehen. Im Gegensatz dazu liegen bei Seil 2 die Umwicklungen teils an falschen Positionen. Dies kann zu Wickelfehlern wie Lücken und dem späteren Einschneiden oberer Lagen in die unteren führen.

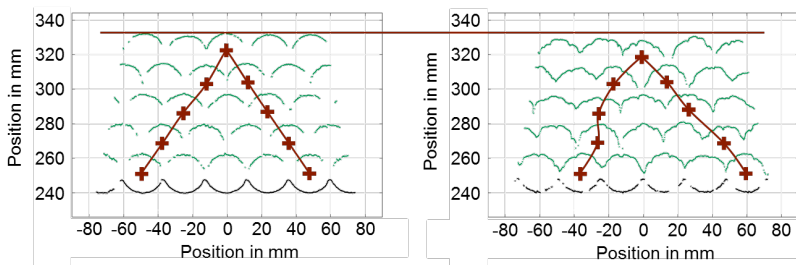


Abbildung 9: Wickelpaket von Seil 1 (links) und Seil 2 (rechts) mit Vergleich der Wickelordnung und der Wickelhöhe

Berechnung des Wickelpaketes

Die im vorangegangenen Kapitel gezeigten Versuchsergebnisse deuten an, dass eine Berechnung des Wickelpaketes aufgrund von kreisförmigen Seilquerschnitten unter Berücksichtigung des Seilnennendurchmessers nicht zu zufriedenstellenden Ergebnissen führen wird.

Als Ausgangspunkt der Berechnung dient daher die Geometrie einer Ellipse. Gleichung 2 gibt dabei die Ellipsengleichung an (Abbildung 10).

$$1 = \frac{x_E^2}{a^2} + \frac{y_E^2}{b^2} \quad 2$$

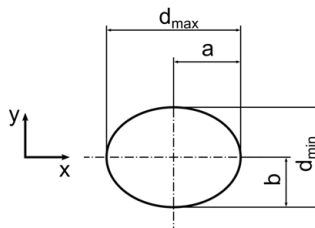


Abbildung 10: Ellipse mit Angabe der relevanten Größen

Der Aufbau des Wickelpaketes kann aus der Geometrie von Seil und Seiltrommel abgeleitet werden. Der Höhenunterschied zwischen zwei Lagen wird durch die Gleichungen 3 für den Parallelbereich und 4 für den Kreuzungsbereich beschrieben (Abbildung 11).

$$\Delta y_{pa} = 2 \cdot \sqrt{b^2 - \frac{b^2}{a^2} \cdot \left(\frac{e}{4}\right)^2} \tag{3}$$

$$\Delta y_{kr} = 2 \cdot \sqrt{b^2 - \frac{b^2}{a^2} \cdot \left(\frac{e}{4} - \Delta x(\varphi)\right)^2} \tag{4}$$

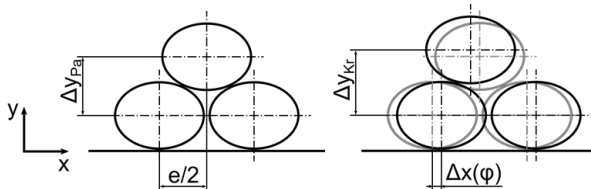


Abbildung 11: Höhenunterschied zwischen zwei Lagen mit ellipsenförmigen Querschnitten im Parallelbereich (links) und Kreuzungsbereich in Abhängigkeit der Trommeldrehung (rechts)

Die Berechnung der Verschiebung des Seils in axialer Trommelrichtung muss abschnittsweise erfolgen, da die Systemrillung diesen Verlauf vorgibt (vgl. Abbildung 2). In den Kreuzungsbereichen liegt dabei jeweils ein linearer Zusammenhang zwischen der Trommeldrehung und der axialen Bewegung vor (Gleichung 5).

$$\Delta x(\varphi) = 0 \quad \text{für} \quad \varphi = 0 \dots \varphi_{pa} \tag{5}$$

$$\Delta x(\varphi) = \frac{\varphi - \varphi_{pa}}{\varphi_{kr}} \cdot \frac{e}{2} \quad \text{für} \quad \varphi = \varphi_{pa} \dots \pi$$

Durch die Auswertung der Gleichungen 3 bis 5 kann der gesamte Verlauf eines Wickelpaketes mit beliebig vielen Umwicklungen und Lagen angegeben werden.

Vergleich zwischen Berechnung und Experiment

Zur Überprüfung der Berechnungen werden diese mit experimentellen Ergebnissen verglichen.

Ermittlung der Umwicklungen

In der gescannten Oberfläche des Wickelpaketes können Umwicklungen anhand unterschiedlicher Vorgehensweisen ermittelt werden. Eine Vorgehensweise ist lokale Maximal- und Minimalstellen der einzelnen Umwicklungen zu ermitteln (Abbildung 12). Der lokale Suchbereich kann dazu in Relation zum Rillenabstand eingegrenzt werden. Die Interpretation ist in diesem Fall, dass jede Maximalstelle den Mittelpunkt der Umwicklung in axialer Trommelrichtung angibt, und die Minimalstelle zwei Umwicklungen trennt.

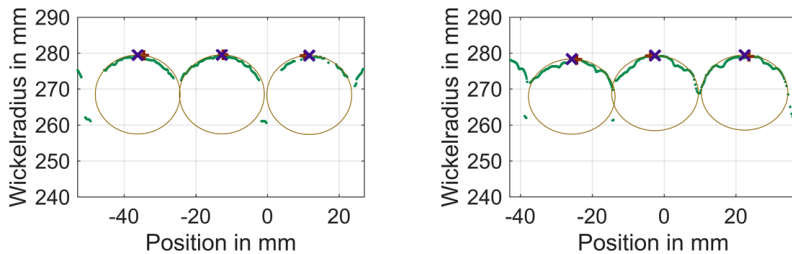


Abbildung 12: Umwicklungen mit Markierung der Maximalstellen (rotes Plus) und Angabe der gefundenen Ellipsen mit deren Maximalstelle (blaues Kreuz): Seil 1 links und Seil 2 rechts

Eine weiterführende Suchmöglichkeit ist es, in jedem Bereich, der durch die Maximalstellensuche einer Umwicklung zugeordnet ist, eine Ellipse mit den aus der Querschnittsmessung bekannten Abmaßen zuzuordnen. Wie in Abbildung 12 zu sehen ist, zeigen beide Verfahren teilweise eine gute Übereinstimmung (Seil 1 mittlere Umwicklung). Gerade bei der ungleichmäßigeren Oberfläche von Seil 2 ergeben sich jedoch auch erhebliche Unterschiede. Der Vorteil der Methode mit den angenäherten Ellipsen liegt daher zum einen in einer stabileren Ermittlung des Mittelpunktes der Umwicklung in axialer Trommelrichtung, zum anderen ergibt sich jedoch auch der Vorteil, dass ein Wert für die radiale Position der Umschlingung vorliegt.

Ergebnisdarstellung

Da die Aufnahmen alle hintereinander erfolgt sind, sieht die Ergebnisdarstellung entsprechend aus. Theoretisch ist zuerst die Rillung zu sehen. Diese wird jedoch aufgrund der bekannten Geometrie ausgeblendet. Anschließend folgen die Lagen 1, 2 und 3 (Abbildung 13, oben). Der theoretische Verlauf der radialen Position ergibt sich aus Gleichungen 3 und 4 in einem konstanten Verlauf der Umwicklung in den Parallelbereichen und einem lagenweise zunehmenden Ausschlag in den Kreuzungsbereichen (Abbildung 13, unten).

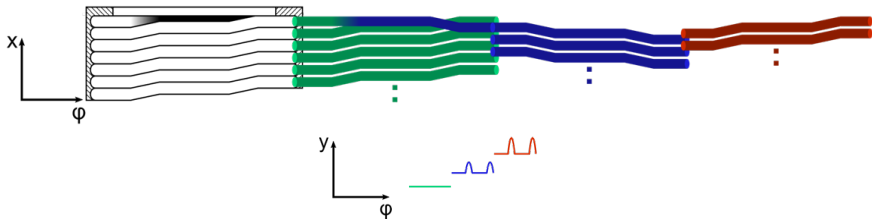


Abbildung 13: schematische Darstellung des axialen Verlaufs (oben) und des radialen Verlaufs (unten) der Umwicklungen während eines Versuchs

In den Abbildung 14 bis Abbildung 18 sind die Verläufe der Seile 1 und 2 in den Lagen 1 bis 5 angegeben. In der ersten Lage zeigen die axialen Verläufe eine gute Übereinstimmung mit dem zu erwartenden Verlauf. Dies ist durch die direkte Führung des Seils in der Rillung begründet. Der experimentelle radiale Verlauf zeigt eine Abweichung vom theoretisch linearen. Grund hierfür ist sowohl eine nicht ideal runde Trommeloberfläche als auch eine nicht ideal glatte Seiloberfläche (Abbildung 14).

1. Lage

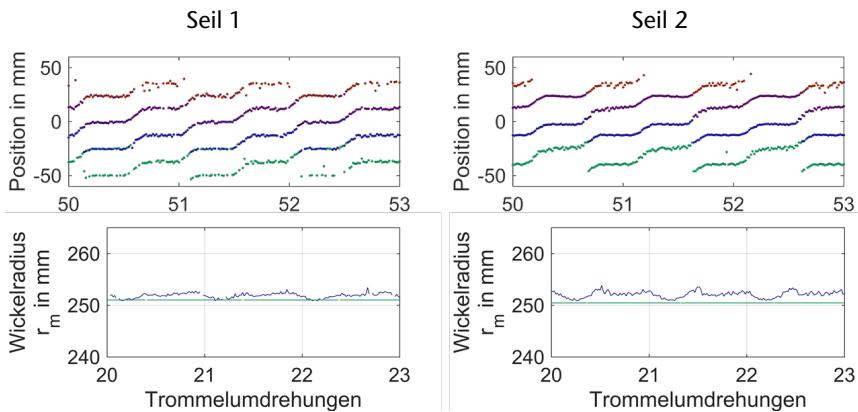


Abbildung 14: Verlauf der Umwicklungen der 1. Lage. Oben die experimentellen Ergebnisse in axialer Trommelrichtung und unten der Vergleich der experimentellen in blau und der theoretischen Ergebnisse in grün in radialer Trommelrichtung

In Abbildung 15 ist der Übergang von der ersten zur zweiten Lage zu sehen. Es ist erkennbar, wie der axiale Verlauf von der positiven in die negative Richtung wechselt. Bei Seil 2 liegt in dieser Auswertung auch in der zweiten Lage ein geordneter Verlauf vor. Seil 1 zeigt demgegenüber einen Verlauf, der darauf hindeutet, dass Seildurchmesser (d_{\max}) und Rillensteigung nicht zusammenpassen. Die Umwicklung wird, bevor es richtigerweise in negativer Richtung weitergeht, kurz von dem darunterliegenden Kreuzungsbereich in die positive axiale Richtung gezogen (vgl. Abbildung 15, Seil 1, axialer Verlauf).

Der theoretische radiale Verlauf beider Seile verläuft unter dem gemessenen. Außerdem sind im Experiment die Ausschläge geringer als berechnet. Das niedrigere Grundniveau lässt sich durch die Stützwirkung der Rillung in der 1. Lage erklären. Die Ausschläge werden als zu groß berechnet, da im Modell keine elastische Verformung des Seilquerschnitts angenommen wird. Dieser Effekt wird mit zunehmender Lagenzahl immer stärker.

2. Lage

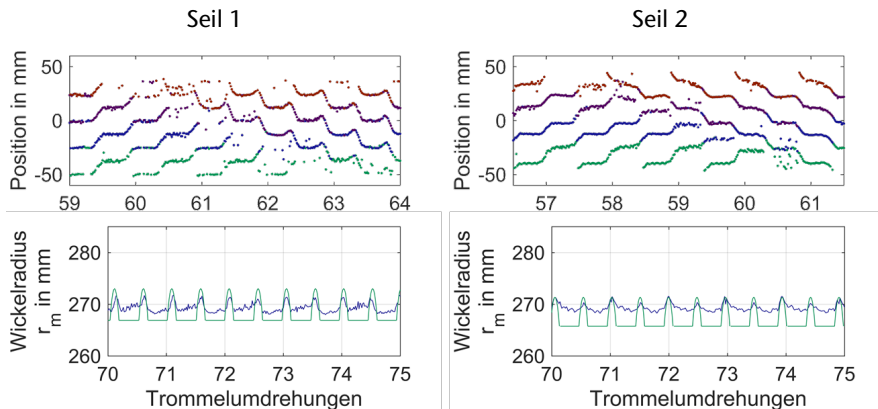


Abbildung 15: Verlauf der Umwicklungen der 1. und 2. Lage. Oben die experimentellen Ergebnisse in axialer und unten der Vergleich der experimentellen in blau und der theoretischen Ergebnisse in grün in radialer Trommelrichtung

In der dritten Lage ist nun bei beiden Seilen erkennbar, dass der Übergang zwischen Parallel- und Kreuzungsbereich immer undeutlicher wird. Die Stützwirkung der Rillung nimmt nun immer mehr ab. Der radiale Verlauf ist noch stärker überzeichnet. Bei Seil 2 ist zudem erkennbar, dass in axialer Richtung der Unterschied zwischen Parallel- und Kreuzungsbereich nicht mehr deutlich zu erkennen ist (Abbildung 16).

3. Lage

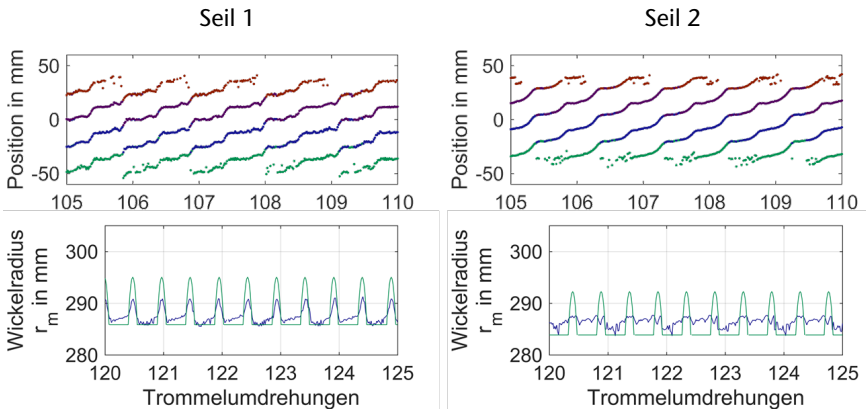


Abbildung 16: Verlauf der Umwicklungen der 3. Lage. Oben die experimentellen Ergebnisse in axialer und unten der Vergleich der experimentellen in blau und der theoretischen Ergebnisse in grün in radialer Trommelrichtung

4. Lage

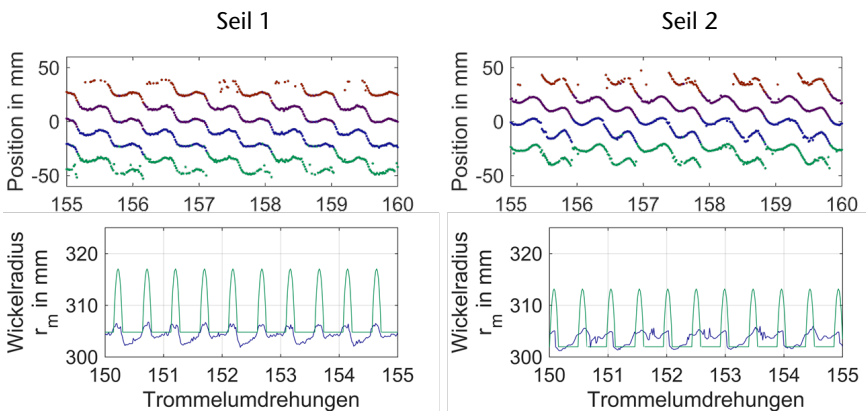


Abbildung 17: Verlauf der Umwicklungen der 4. Lage. Oben die experimentellen Ergebnisse in axialer und unten der Vergleich der experimentellen in blau und der theoretischen Ergebnisse in grün in radialer Trommelrichtung

Die vierte Lage zeigt bei beiden Seilen die Wellenbewegung in axialer Richtung. In radialer Richtung ist bei Seil 2 erkennbar, dass die berechnete Wickelhöhe im Parallelbereich recht gut mit dem Experiment übereinstimmt (Abbildung 17).

In Abbildung 18 ist die fünfte und letzte Lage zu sehen. Der axiale Verlauf weist nun keinen ausgeprägten Parallelbereich mehr auf. Beide Seile verlaufen eher mit einer gleichmäßigen Steigung, die nur kurz unterbrochen wird. In radialer Richtung ergibt sich für Seil 1 nach dem Modell ein deutlich zu großer Wickelradius. Bei Seil 2 fällt die Differenz etwas geringer aus. Festzuhalten bleibt jedoch, dass bei beiden Seilen das Modell sowohl für den Parallel- als auch für den Kreuzungsberiech zu große Werte liefert (Abbildung 18).

5. Lage

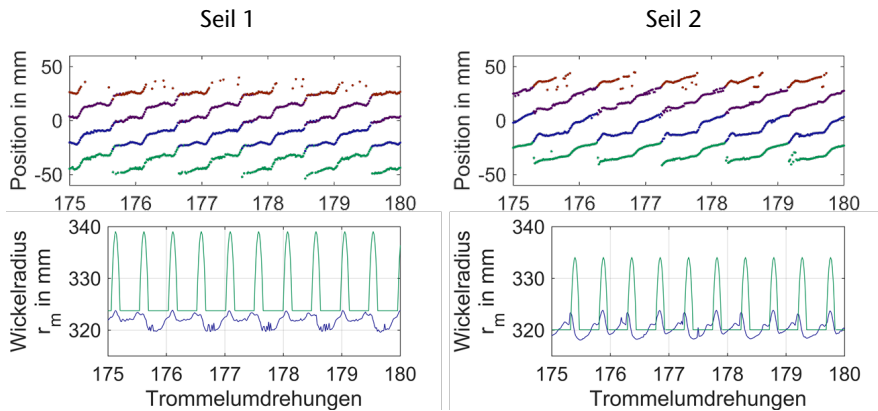


Abbildung 18: Verlauf der Umwicklungen der 5. Lage. Oben die experimentellen Ergebnisse in axialer und unten der Vergleich der experimentellen in blau und der theoretischen Ergebnisse in grün in radialer Trommelrichtung

Kritik am Modell

Insgesamt zeigt sich, dass das Modell vergleichbare Werte wie der gemessene Wickelradius liefert. Soll jedoch eine Trommel auf ein Seil abgestimmt werden, sind nur die gemessenen Werte brauchbar. Es ist somit notwendig, im Modell auch die elastische Verformung der Seilquerschnitte zu berücksichtigen. Zudem wird angestrebt, auch den axialen Verlauf quantifizierbar zu bewerten. Mit diesen beiden Werten ließe sich zum einen eine Trommel auslegen und zum anderen die Spulqualität anschließend objektiv bewerten.

Anwendung

Durch die Kenntnis des Verlaufs der Umwicklungen kann die Geometrie der Seiltrommel auf die Geometrie des Faserseils angepasst werden. Dazu wird die Rillung entsprechend des deformierten Seilquerschnitts geformt. An den Bordscheiben werden Auffüllgeometrien vorgesehen, damit keine Hohlräume zwischen dem Wickelpaket und der Bordscheibe entstehen. Der Übergang zwischen Parallel- und Kreuzungsbereich wird zusätzlich abgeflacht, um einen gleichmäßigen Übergang zwischen den Bereichen zu erreichen (Abbildung 19).



Abbildung 19: Seiltrommel mit angepasster Rillung und Auffüllgeometrien

In Abbildung 20 sind die Wickelbilder von Seil 1 und Seil 2 zu sehen. Die Seile wurden auf einer Seiltrommel für Drahtseile gewickelt und zeigen daher vor allem im Bereich der Bordscheiben kein optimales Wickelbild. Zum Vergleich ist in derselben Abbildung auf der rechten Seite eine Kombination von einem Faserseil und einer darauf abgestimmten Trommel zu sehen. Es zeigt sich über die gesamte Wickelbreite ein gutes Wickelbild. Dabei ist jedoch zu beachten, dass es sich nicht um dieselbe Trommel handelt. Auch die Verhältnisse von Trommellänge zu Trommeldurchmesser unterscheiden sich. Während die Trommel bei den Versuchen mit Seil 1 und 2 ein Verhältnis von ungefähr 2 aufweist, hat die Vergleichstrommel ein Verhältnis von 1,5. Es ist jedoch zu erwarten, dass sich auch bei anderen Verhältnissen die gleiche Verbesserung des Wickelbildes einstellt.

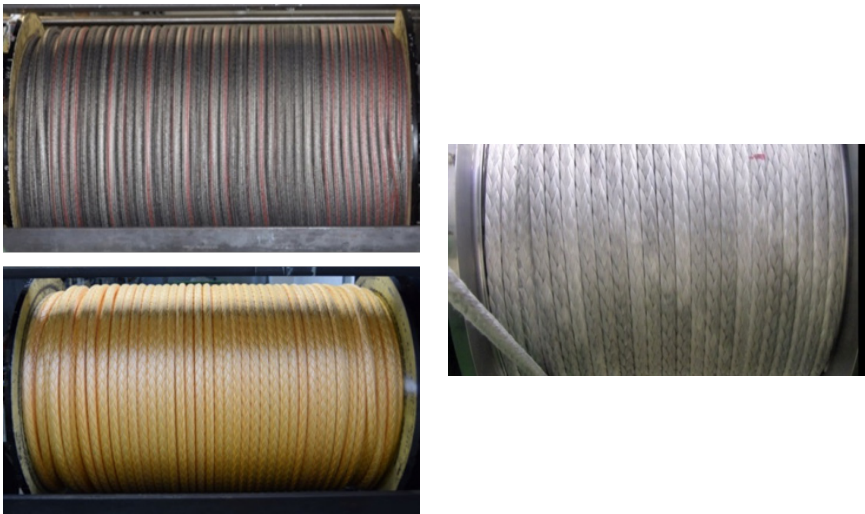


Abbildung 20: Wickelbilder von Seil 1 (oben links) und Seil 2 (unten links) im Vergleich zu einem Wickelbild mit auf das Faserseil abgestimmter Trommelgeometrie (rechts)

Zusammenfassung

Zur Auslegung von mehrlagig mit Faserseilen bewickelten Seiltrommeln ist es zum einen unter Leichtbaugesichtspunkten unerlässlich, den genauen Wickelverlauf zu kennen. Zum anderen muss auch die sich beim Wickeln verformende Seilgeometrie zur Seiltrommel passen um ein optimales Wickelergebnis zu erhalten.

Dies kann durch die Messung mit Hilfe von Laser-Profil-Sensoren und die anschließende Anpassung zwischen Seil und Seiltrommel erfolgen. Die andere Möglichkeit liegt in der Berechnung des Seilpaketes. Das vorgestellte Modell zeigt dabei einen ersten Schritt wie die Deformation des Seilquerschnitts bei der Berechnung des Wickelpaketes berücksichtigt werden kann.

Der vorliegende Artikel war in weiten Teilen auch Beitrag auf dem 8. Fachkolloquium InnoZug 2018 in Chemnitz /6/.

Literatur

- /1/ Dietz, P.: Ein Verfahren zur Berechnung ein- und mehrlagig bewickelter Seiltrommeln; Dissertation, Technische Hochschule Darmstadt, Darmstadt, 1971
- /2/ Mupende, I.: Beanspruchungs- und Verformungsverhalten des Systems Trommelmantel – Bordscheiben bei mehrlagig bewickelten Seiltrommeln unter elastischem und plastischem Werkstoffverhalten; Dissertation, TU Clausthal, Curvillier Verlag Göttingen, 2001
- /3/ Lohrengel, A.; Stahr, K.; Schulze, M.; Wächter, M.: Innovative drum construction for multilayer winding with fibre ropes; Proceedings OIPEEC 2015, Stuttgart, 2015
- /4/ Lohrengel, A.; Stahr, K.; 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
- /5/ Lohrengel, A.; Schulze, M.; Erlendsson, H.; Magnusson, J.A.; Smeets, P.; Tacken, B.: The influence of high performance fibre rope designs on drum load and spooling performance in multi-layer drum equipment; OIPEEC 2017, La Rochelle, France, 2017
- /6/ Schulze M.; Lohrengel, A.; Wächter, M.: Faserseile auf mehrlagig bewickelten Seiltrommeln, 8. Fachkolloquium InnoZug, 6. und 7. September 2018, Technische Universität Chemnitz