

Geometrische Überlegungen zu plastikummantelten Drahtseilen

Stök, M.; Lohrengel, A.

Bei der mehrlagigen Bewicklung mit außen kunststoffummantelten Drahtseilen verformt sich die Ummantlung unter den im Wickelpaket wirkenden Lasten stark und nimmt je nach Rillungsbereich der Seiltrommel eine quadratische oder sechseckige Form an. Wenn der Kunststoffmantel zu dünn ist, führt dieses Phänomen zu einer vollständigen Verdrängung des Kunststoffs aus dem Kontaktbereich zwischen zwei Seilen. Die Bestimmung der Mindestmanteldicke basiert auf den geometrischen Einschränkungen, die durch die Trommel- und Seilgeometrie vorgegeben sind.



In the case of multi-layer spooling with externally plastic-coated wire ropes, the plastic coating deforms considerably under the loads that occur in the spooling package, resulting in a square or hexagonal shape depending on the groove area of the rope drum. If the plastic coating is insufficiently thick, this phenomenon results in the complete displacement of the plastic from the contact between the two ropes. The determination of the minimum coating thickness is based on the geometric restrictions imposed by the drum and rope geometry.

Einleitung

Seile sind als unverzichtbares Maschinenelement seit Jahrhunderten ein fester Bestandteil technischer Anwendungen und Industrien. Im Gegensatz zu vielen anderen Maschinenelementen weisen sie jedoch Verschleiß auf und besitzen eine begrenzte Lebensdauer, sie sind nicht dauerfest /1/. Aufgrund der fortschreitenden Sensibilisierung für Ressourcenschonung und Nachhaltigkeit ist die Maximierung der Lebensdauer von großer Bedeutung. Ein Drahtseil muss abgelegt werden, sobald eine kritische Anzahl an äußeren Drahtbrüchen auftritt. Diese sind das Resultat der hohen mechanischen Belastung der Drähte, die beim Lauf über Scheiben und in der Mehrlagenwicklung auf Seiltrommeln auftreten.

Um die Lebensdauer von Drahtseilen zu erhöhen wird eine Ummantelung der Drahtseile mit Kunststoff untersucht. Diese soll die Last in Kontaktbereichen über eine größere Fläche verteilen und somit die Beanspruchung der einzelnen Außendrähte reduzieren, was zu einer verlängerten Lebensdauer des Seils führt. Zudem bietet der Kunststoffmantel zusätzliche Vorteile wie verbesserte Treibfähigkeit und Schutz vor eindringenden Schmutzpartikeln.

Darüber hinaus führt die Mehrlagenwicklung von kunststoffummantelten Drahtseilen auf Seiltrommeln zu speziellen Herausforderungen. Bei Trommeln mit einer Systemrillung ist der Trommelmantel in den Parallel- und den Kreuzungsbereich unterteilt. In den beiden Bereichen sind die Seilwindungen jeweils unterschiedlich gestapelt. Während in der Mitte des Kreuzungsbereichs die Seile in einer Säule übereinandergestapelt sind, weisen sie im Parallelbereich eine pyramidale Stapelung auf. Dies ist in Abbildung 1 dargestellt. Aus den unterschiedlichen Stapelanordnungen ergeben sich unterschiedliche Packungsdichten und Deformationen der Seile. Im Parallelbereich wird der ursprünglich runde Kunststoffmantel zu einem Sechseck verformt, der Kunststoff wird in den Wickelversuchen lange Zeit jedoch nicht beschädigt. Im Kreuzungsbereich, in dem der Kunststoffmantel zu einem Rechteck umgeformt wird, kriecht der Kunststoff in Wickelversuchen komplett aus dem Seil-Seil-Kontakt heraus. Dieses Verhalten ist für Faserseile /2/ bereits dokumentiert und konnte für kunststoffummantelte Drahtseile bereits in /3/ gezeigt werden.

In diesem Beitrag wird die mögliche Deformation des Kunststoffmantels aufgrund der geometrischen Randbedingungen beschrieben. Dabei wird die minimale Dicke bestimmt, die der Kunststoffmantel für jeden der beiden Trommelbereiche haben muss, damit die Stahlseile selbst bei einer Deformation des Kunststoffmantels nicht miteinander in Kontakt kommen, sondern Kunststoff im Kontakt verbleibt und seine Schutzaufgabe wahrnehmen kann.

Geometrische Randbedingungen

Der Elastizitätsmodul und die Zugfestigkeit von Kunststoff sind geringer als der Querelastizitätsmodul von Drahtseilen. Die Verformung des Drahtseildurchmessers d_r wird deshalb bei den nachfolgenden Betrachtungen vernachlässigt. Des Weiteren wird bei Kunststoffen von Inkompressibilität ausgegangen.

In der Mehrlagenwicklung erfahren die unteren Wickellagen einen Druck durch die darüberliegenden. Der Kunststoff wird somit in die Hohlräume des Wickelpaketes verdrängt, bis diese komplett gefüllt sind. Dies ist in Abbildung 1 oben für den Parallelbereich und unten für den Kreuzungsbereich dargestellt. Es ist ersichtlich, dass sich im Parallelbereich ein sehr unregelmäßiges Sechseck bildet, welches in Gelb dargestellt ist. Im Kreuzungsbereich entsteht ein Rechteck. Die Größe der zu bestimmenden deformierten Kunststofffläche wird in eine Richtung jeweils von dem Windungsabstand e begrenzt. Der Windungsabstand e ist wiederum von dem unbekanntem Außendurchmesser der Kunststoffummantelung d_p abhängig und wird mit dem Faktor y je nach Anwendung festgelegt

$$e = y \cdot d_p. \tag{1}$$

Aufgrund der Nichtberücksichtigung der Deformation des Drahtseildurchmessers ist die Querschnittsfläche des Drahtseils konstant und wird nicht weiter berücksichtigt.

Die Querschnittsfläche des undeformierten kunststoffummantelten Seils ergibt sich aus der Kreisfläche mit dem Außendurchmesser des Kunststoffmantels d_p

$$A_p = \frac{\pi}{4} \cdot d_p^2 \quad (2)$$

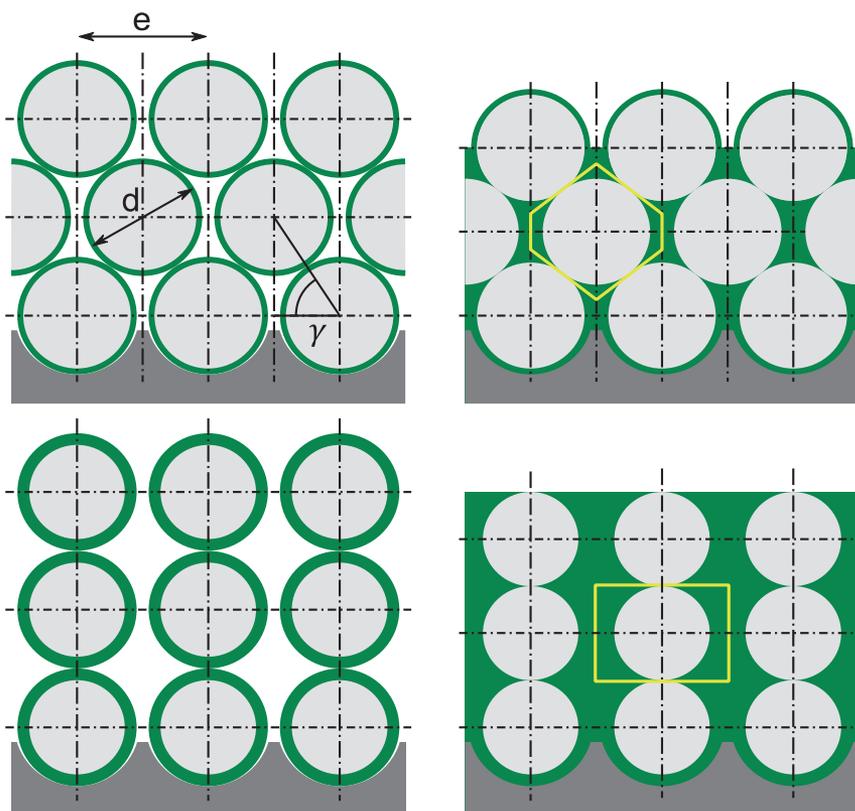


Abbildung 1: Die unterschiedlichen Seilanordnungen einer Seiltrommel mit Systemrillung. In Gelb ist jeweils die theoretische Fläche des Kunststoffmantels dargestellt.

Minimaler Kunststoffmantel in Kreuzungsbereich

Für den Kreuzungsbereich ergibt sich die deformierte Querschnittsfläche A_{kb} aus dem Windungsabstand e und dem Drahtseildurchmesser d_r

$$A_{kb} = e \cdot d_r. \quad (3)$$

Aufgrund der Inkompressibilität des Kunststoffes gilt Flächenkonstanz zwischen dem undeformierten und dem deformierten Kunststoffquerschnitt, es gilt unter Verwendung der Gleichungen (1) bis (3)

$$\begin{aligned} A_p = A_{kb} &\rightarrow \frac{\pi}{4} \cdot d_{p,kb}^2 = e \cdot d_r \rightarrow \frac{\pi}{4} \cdot d_{p,kb}^2 = y \cdot d_{p,bk} \cdot d_r \\ &\rightarrow d_{p,kb}^2 - \frac{4}{\pi} \cdot y \cdot d_r \cdot d_{p,kb} = 0 \end{aligned} \quad (4)$$

Da 0 kein sinnvolles Ergebnis der quadratischen Gleichung ist, ergibt sich der minimale Außendurchmesser für ein kunststoffummanteltes Seil im Kreuzungsbereich $d_{p,kb}$ zu

$$d_{p,cs} = \frac{4 \cdot y}{\pi} \cdot d_r \approx 1.35 d_r. \quad (5)$$

Minimaler Kunststoffmantel im Parallelbereich

Zur Berechnung des Sechsecks im Parallelbereich kann dieses als Raute betrachtet werden, von dem zwei Dreiecke abgezogen werden. Dies ist inklusive aller verwendeten Längenbezeichnungen in Abbildung 2 dargestellt. Die Fläche einer Raute berechnet sich aus den noch unbekanntenen Längen der beiden Diagonalen wie folgt

$$A_{Raute} = \frac{1}{2} \cdot g \cdot f. \quad (6)$$

Für den Winkel γ gelten folgende trigonometrische Beziehungen, vgl. Abbildung 1

$$\cos(\gamma) = \frac{\frac{e}{2}}{d_r} = \frac{d_r}{g}; \quad \sin(\gamma) = \frac{d_r}{f} = \frac{\sqrt{d_r^2 - \left(\frac{e}{2}\right)^2}}{d_r} \quad (7)$$

$$\rightarrow g = \frac{2 \cdot d_r^2}{e}; \quad f = \frac{d_r^2}{\sqrt{d_r^2 - \left(\frac{e}{2}\right)^2}} \quad (8)$$

Damit ergibt sich die Fläche der Raute zu

$$A_{Raute} = \frac{d_r^2}{e} \cdot \frac{d_r^2}{\sqrt{d_r^2 - \left(\frac{e}{2}\right)^2}} = \frac{d_r^4}{e \cdot \sqrt{d_r^2 - \left(\frac{e}{2}\right)^2}} \quad (9)$$

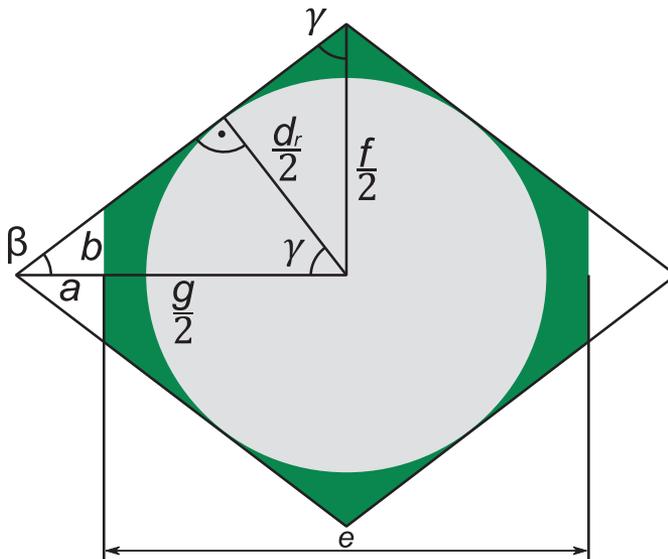


Abbildung 2: Die grüne Fläche entspricht dem Kunststoff, der graue Kreis dem Drahtseil und die beiden weißen Dreiecke sind von der Raute abzuziehen.

Von der Rautenfläche müssen jedoch noch zwei kleinere Dreiecke abgezogen werden. Hierzu wird die Höhe des Dreiecks a bestimmt. Diese ergibt sich als die halbe Differenz der Seite g und dem Rillenabstand e

$$a = \frac{g - e}{2} = \frac{d_r^2}{e} - \frac{e}{2}. \quad (10)$$

Die Kantenlänge b kann beschrieben werden in Abhängigkeit von a

$$\tan(\beta) = \frac{b}{a} \rightarrow b = \tan(\beta) \cdot a. \quad (11)$$

Da das betrachtete Dreieck rechtwinklig ist, gelten folgende Beziehungen

$$90^\circ = \gamma + \beta \rightarrow \beta = 90^\circ - \gamma \quad (12)$$

$$\sin(90^\circ - \gamma) = \cos(\gamma) \quad (13)$$

$$\cos(90^\circ - \gamma) = \sin(\gamma) \quad (14)$$

Mit den Gleichungen (7) und (11) bis (14) kann der $\tan(\beta)$ auch folgendermaßen dargestellt werden

$$\tan(\beta) = \frac{\sin(\beta)}{\cos(\beta)} = \frac{\sin(90^\circ - \gamma)}{\cos(90^\circ - \gamma)} = \frac{\cos(\gamma)}{\sin(\gamma)}$$

$$\tan(\beta) = \frac{\frac{e}{2}}{d_r} = \frac{e}{2 \cdot \sqrt{d_r^2 - \frac{e^2}{4}}} \quad (15)$$

Die Fläche des kleinen abzuziehenden Dreiecks A_D berechnet sich damit zu

$$A_D = a \cdot b = a \cdot \tan(\beta) \cdot a = a^2 \cdot \tan(\beta)$$

$$= \left(\frac{d_r^2}{e} - \frac{e}{2} \right) \cdot \frac{e}{2 \cdot \sqrt{d_r^2 - \frac{e^2}{4}}} \quad (16)$$

$$= \frac{d_r^4}{2 \cdot e \cdot \sqrt{d_r^2 - \frac{e^2}{4}}} - \frac{d_r^2 \cdot e}{2 \cdot \sqrt{d_r^2 - \frac{e^2}{4}}} + \frac{e^3}{8 \cdot \sqrt{d_r^2 - \frac{e^2}{4}}}$$

Die Fläche des unregelmäßigen Sechsecks aus Kunststoff A_{pb} berechnet sich aus den Gleichungen (9) und (16) zu

$$A_{pb} = A_{Raute} - 2 \cdot A_D$$

$$= \frac{d_r^2 \cdot e}{\sqrt{d_r^2 - \frac{e^2}{4}}} - \frac{e^3}{4 \cdot \sqrt{d_r^2 - \frac{e^2}{4}}} \quad (17)$$

Für die Fläche des unregelmäßigen Sechsecks gilt, wie bereits im Kreuzungsbe-
reich, Flächenkonstanz aufgrund der Inkompressibilität des Kunststoffes. Daher
folgt aus den Gleichungen (1), (2) und (17):

$$A_{pb} = A_p \rightarrow \frac{d_r^2 \cdot e}{\sqrt{d_r^2 - \frac{e^2}{4}}} - \frac{e^3}{4 \cdot \sqrt{d_r^2 - \frac{e^2}{4}}} = \frac{\pi}{4} \cdot d_p^2$$

$$\frac{d_r^2 \cdot y \cdot d_p}{\sqrt{d_r^2 - \frac{y^2 \cdot d_p^2}{4}}} - \frac{y^3 \cdot d_p^3}{4 \cdot \sqrt{d_r^2 - \frac{y^2 \cdot d_p^2}{4}}} - \frac{\pi}{4} \cdot d_p^2 = 0 \quad (18)$$

Die Lösung der Gleichung nach dem Außendurchmesser $d_{p,pb}$ führt zu der einzigen physikalisch sinnvollen Lösung von

$$d_{p,pb} = \frac{4 \cdot y}{\sqrt{4 \cdot y^4 + \pi^2}} \cdot d_r \approx 1.094 \cdot d_r. \quad (19)$$

Wenn das Seil mit einem dickeren Kunststoffmantel ummantelt wird, verbleibt selbst bei vollständiger Verformung des Mantels noch Kunststoff im Kontakt zwischen den beiden Seilen. Dazu wird in Gleichung (18) der Seildurchmesser durch einen Durchmesser mit Faktor ersetzt und das ganze nach dem Faktor aufgelöst. Mit dem Drahtseildurchmesser und dem Faktor kann so die Stärke des im Kontakt verbleibenden Kunststoffmantels berechnet werden:

$$\Delta r = \frac{\frac{\sqrt{4 \cdot y^4 + \pi^2} \cdot d_p}{4 \cdot y} - d_r}{2}. \quad (20)$$

Resultierende Prüfgeometrie

Die Querelastizität von Seilen wird auf dem institutseigenen Prüfstand ermittelt. Um eine realistische Quersteifigkeit für den Parallelbereich zu bestimmen soll die Deformation zum Sechseck berücksichtigt werden. Es wird vermutet, dass die Steifigkeit nach der vollständigen Umformung des Kunststoffes aufgrund der Inkompressibilität zunimmt. Im aktuellen Forschungsprojekt werden Drahtseile mit einem Durchmesser $d_r = 12 \text{ mm}$ mit Kunststoff auf einen Außendurchmesser $d_p = 14 \text{ mm}$ ummantelt. Der Windungsabstand ist $e = 14,7 \text{ mm}$.

Zuerst wird der im Kontakt verbleibende Kunststoff mit Gleichung (20) berechnet.

$$\Delta r = \frac{\frac{\sqrt{4 \cdot y^4 + \pi^2} \cdot d_p}{4 \cdot y} - d_r}{2} = \frac{\frac{\sqrt{4 \cdot \frac{14,7\text{mm}^4}{14\text{mm}} + \pi^2} \cdot 14\text{mm}}{4 \cdot \frac{14,7\text{mm}}{14\text{mm}}} - 12\text{mm}}{2} \quad (21)$$

$$\Delta r = 0,397 \text{ mm}.$$

Der für den Keilwinkel γ relevante Durchmesser d beträgt damit

$$d = d_r + 2 \cdot \Delta r = 12\text{mm} + 2 \cdot 0,397 \text{ mm} = 12,794\text{mm} \quad (22)$$

Der Winkel 2γ beschreibt die in den Prüfbacken einzubringenden Winkel und kann aus Umstellung von Gleichung (7) berechnet werden.

$$\gamma = \cos^{-1} \left(\frac{e}{d} \right) = \cos^{-1} \left(\frac{7,85 \text{ mm}}{12,794 \text{ mm}} \right) = 54,936^\circ \quad (23)$$

Für die Prüfbacken ist deshalb ein Winkel von 110° vorgesehen.

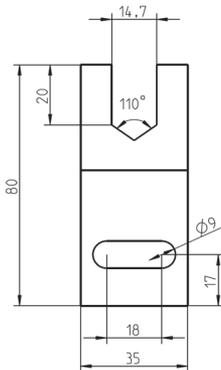


Abbildung 3: Technische Zeichnung und reale Ausführung der Querprüfbacken

Zusammenfassung

Da Seile lediglich über eine Zeitfestigkeit verfügen, wird zur Ressourcenschonung an der Verlängerung Ihrer Lebensdauer geforscht. Derzeit wird die Ummantelung von Drahtseilen mit Kunststoff für die Mehrlagenwicklung untersucht. In der Mehrlagenwicklung wird der Kunststoff jedoch aus den Kontakten der Seile im Wickelpaket herausgedrückt. Es wurde daher die minimale Dicke des Kunststoffmantels im Kreuzungs- und Parallelbereich berechnet, sowie die Stärke des verbleibenden Kunststoffs bei einer großzügigeren Ummantelung.

Literatur

- /1/ Wehking, K.; Hecht, S.; Moll, D.; Novak, G.; Verreet, R.: Laufende Seile - Bemessung und Überwachung. 5. Renningen: Expert Verlag, 2018. – ISBN 978–3–8385–5191–3
- /2/ Ernst, B.; Mupende, Y.: Hochfestes Faserseil als Hubseil in Kranen mit Mehrlagenwicklung. In: Wehking, Karl-Heinz (Hrsg.): 6. Stuttgarter Seiltrage: Material, Anwendung & Prüfung, 2018. – ISBN 978–3–00–059115–0, S. 1–12
- /3/ Stök, M.; Recknagel, T.; Wächter, M.; Lohrengel, A.; Schmidt, T.: Lifetime and suitability for multi-layer spooling of running wire ropes with plastic coating. Stuttgart, Germany: Proceedings of the OIPEEC Conference, Pengzhu Wang, 2022. – ISBN 978–1–7336004–1–5