

# Einfluss der Seildämpfung auf die Trommelbelastungen bei Bewicklung mit Kunststoffseilen oder Kunststoff – Stahl Seilen

Forschungsvorhaben gefördert durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft DFG

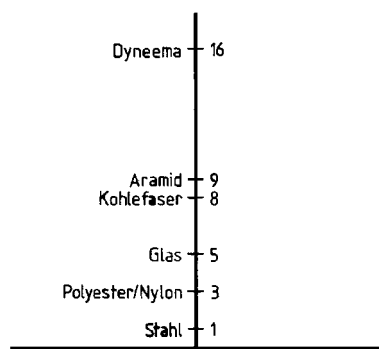
Dietz, P; Mupende, I.

*Das Kunststoffseil erweist sich wegen seiner vielfältigen Vorteile im Vergleich mit dem Stahlseil als Seil der Zukunft. Sein Verhalten auf der Trommel weicht von dem eines Stahlseils ab und führt zu einem anderen Lastentstehungsmechanismus auf dem System Mantel-Bordscheibe. Dieser Artikel stellt einen Auszug der Untersuchungsergebnisse zum Einfluss der Seildämpfung auf die Lastauswirkung auf den Mantel dar.*

*Synthetic ropes have a sure future due to her numerous advantages compared to steel ropes. The behaviour on the drum is different from that of steel ropes. This induces also another mechanism of charge development on the hoisting drum. The following article gives a short summary of the results of the investigations about the influence of damping on the behaviour of the hoisting drum with synthetic ropes.*

## 1 Einleitung

Heute werden in der Fördertechnik immer größere Seillängen unter hoher Zugkraft eingesetzt. Ohne ein optimiertes Auslegungskonzept führt dies zu großen Seilquerschnitten bei Stahlseilen, welche große Trommeldurchmesser zur Folge haben. Die Lasttragfähigkeit nimmt in diesem Fall sehr stark ab. Die Kunststoffseile besitzen im Vergleich zum Stahlseil bei gleicher Lasttragfähigkeit nur ein Achtel des Seilgewichts, damit ergeben sich sehr geringe Beanspruchungen durch das Seilgewicht.



**Bild 1:** Auf Stahlseillänge bezogene Seillänge unter der das Seil infolge Eigengewicht bricht

Durch diese Vorteile werden den Kunststoffseilen für Anwendungen der Fördertechnik im Allgemeinen eine sichere Zukunft vorhergesagt.

Im Gegensatz zu Amerika, wo Kunststoffseile schon bei laufenden Seilen im mittleren Lastbereich im Einsatz sind, steht das Kunststoffseil bei den deutschen Seilherstellern größtenteils in der Endphase der Entwicklung und kommt langsam auf den Markt. Dies bedeutet für den Konstrukteur von Windtrieben neue Möglichkeiten der Potenzialsteigerung, gleichzeitig müssen die Charakteristika der neuen Seile in eine Berechnung der Seile, Trommeln und weiteren Elemente einfließen.

Im Rahmen eines von der DFG geförderten Forschungsvorhabens wird das Verhalten der mehrlagig bewickelten Windtrommel mit Kunststoffseilen im Institut für Maschinenwesen untersucht. Dieser Artikel stellt einen Auszug aus diesen Ergebnissen dar, nämlich den Einfluss der Dämpfung des Kunststoffseiles auf die Belastungsentwicklung auf die Trommel.

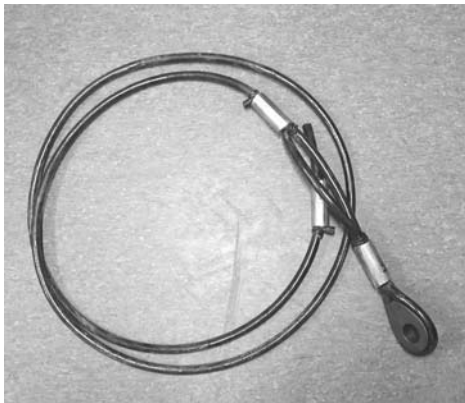
## 2 Das Kunststoffseil

Die Eigenschaften, insbesondere die Festigkeit und Federsteife, von Kunststoffseilen können bei stehenden Seilen als gesichert und der Berechnung zugänglich bezeichnet werden. Dies ist nicht der Fall bei laufenden Seilen. Den vielen Vorteilen, welche das Seil besitzt, stehen auch einige Nachteile und Unsicherheiten gegenüber, welche nicht zu vernachlässigen sind: Kunststoffseile besitzen große Dehnungen im Vergleich zu Stahlseilen, im Dauerbetrieb besteht die Gefahr einsetzender Sprödigkeit, in vielen Fällen stört die unbefriedigende UV Stabilität oder bei bestimmten Fasertypen schlechte Recyclingeigenschaften. Neben der ebenfalls neu zu entwickelnden Verseilungstechnik konzentrieren sich die Seilhersteller zur Zeit auf die Aufklärungen dieser Zusammenhänge und die Behebung der Nachteile.

**Bild 2** stellt das einfache Zugseil und **Bild 3** ein Kunststoffseil mit Schutzmantel für den laufenden Einsatz dar.



**Bild 2:** Einfache Kunststoff Zugseile

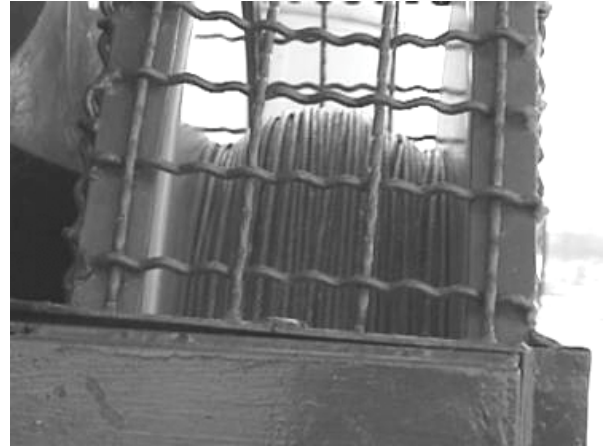


**Bild 3:** Kunststoffseil für laufenden Einsatz

Ein Bereich, wo das Seilgewicht eine große Bedeutung hat, ist der Segelflugbereich. Das Kunststoffseil verkürzt im Vergleich zum Stahlseil die Schleppphase. Der Startimpuls ist durch die hohe Massenträgheit des Stahlseils bei einer Aufwicklungsgeschwindigkeit von ca. 120 km/h stark gedämpft. Der Höhengewinn gegenüber dem Stahlseil wächst überproportional mit der Schleppstrecke und beträgt bis zu 30% /1/. Weiterhin kann das Stahlseil leicht in Schwingung geraten, dieses Problem tritt bei dem Kunststoffseil nicht auf.

Die Aufwicklung wird in den wenigen Einsatzfällen auf einem glatten Trommelmantel durchgeführt und benötigt ein Führungssystem, welches problemlos bei dem Kunststoffseil funktioniert.

**Bild 4** zeigt eine klassische mehrlagige Bewicklung auf einem glatten Mantel einer Segelflugwinde und **Bild 5** stellt die Aufwicklung mit sogenannten „Mooring Winches“ dar. Diese besondere Seiltrommel wird im Schiffsbau benutzt. Das Seil wird nur mit einer Lage unter Zugkraft aufgewickelt und dann auf der anderen Seite der Trommel lastfrei gespeichert.



**Bild 4:** Mehrlagig bewickelte Trommel mit einem 12fach geflochtenen 4,5 mm Kunststoffseil aus hochmoduligen Polyethylen-Fasern (Dyneema) /1/

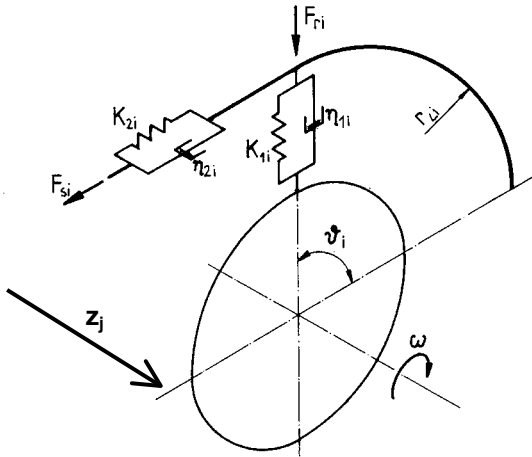


**Bild 5:** Mooring Winches im Schiffbau

Im Aufzugsbereich hat im Jahr 2000 die Firma Schindler das Kunstfaserseil aus Aramid eingesetzt. Dieses ist viermal leichter als ein Stahlseil und hat einen kleineren Biegeradius von ca. 8/1, welcher bei Stahl von 20/1 bis 27/1 beträgt. Weiterhin ist der Einsatz erheblich kleinerer Antriebe bei der geringeren Gewichtbelastung möglich /2/.

**2.1 Das Ersatzmodell für die Bewicklung mit Kunststoffseil**

Im Gegensatz zum Ersatzmodell für das Stahlseil, bei dem das Verhalten des Seiles einfach als Feder angenommen wird, muss bei Kunststoffseilen die Dämpfung mitberücksichtigt werden. **Bild 6** zeigt das Ersatzmodell bei der Aufwicklung der Windung j in der Lage i für ein Kunststoffseil.



**Bild 6:** Ersatzmodell des Systems Seiltrommel bei der Aufwicklung mit einem Kunststoffseil für eine Windung j in der Lagen i

Das Verhalten des Kunststoffseils kann in dem System Seiltrommel durch ein Dämpfungs- und Federglied dargestellt werden. Die agierenden Kräfte sind die Zugkraft  $F_{si}$  bzw. die Radialkraft  $F_{ri}$ .

Der Gleichgewichtszustand des Seiles kann in Radial- bzw. in Längsrichtung mit den Gleichungen **Gl. (01)** und **Gl. (02)** beschrieben werden.

$$\eta_{1i} \frac{dx_i}{dt} + K_{1i} x_i = F_{ri}(t) \quad \text{Gl. (01)}$$

$$\eta_{2i} \frac{dy_i}{dt} + K_{2i} y_i = F_{si}(t) \quad \text{Gl. (02)}$$

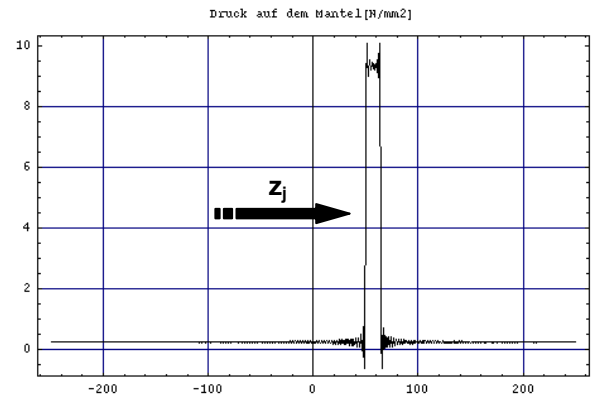
Die Radialkraft  $F_{ri}$  entsteht nicht sofort oder plötzlich, wie es bei den Gleichgewichtsbedingungen des Stahlseiles angenommen wird, sondern wächst mit der Zeit bis zu dem maximalen Wert. Dies geschieht während der Drehbewegung der Trommel über den Winkel  $\theta_i$ . Die Radialkraft kann daher mit der **Gl. (03)** beschrieben werden.

$$F_{ri}(t) = \frac{F_{si}(t)}{r_{Li}} \frac{\omega}{\vartheta_i} t \quad \text{Gl. (03)}$$

Da der Druck auf den Mantel in der Position  $z_j$  als lokale Last wirkt, kann er fiktiv auf den Mantel durch die Fourierreihe **Gl. (04)** verteilt werden. Das **Bild 7**

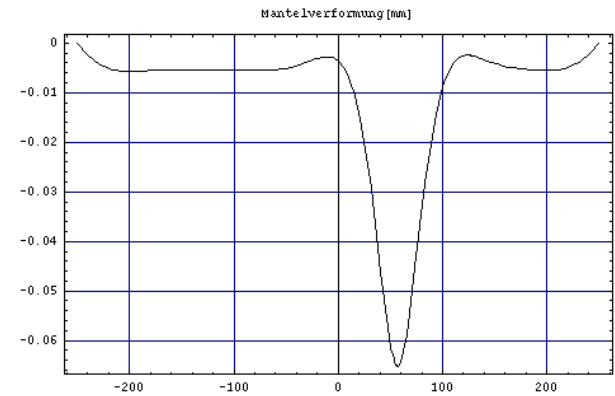
zeigt beispielsweise den Druck unter der Windung auf der Position  $z_j$  an.

$$p(z) = \frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^{\infty} (a_k \cos kz + b_k \sin kz) \quad \text{Gl. (04)}$$



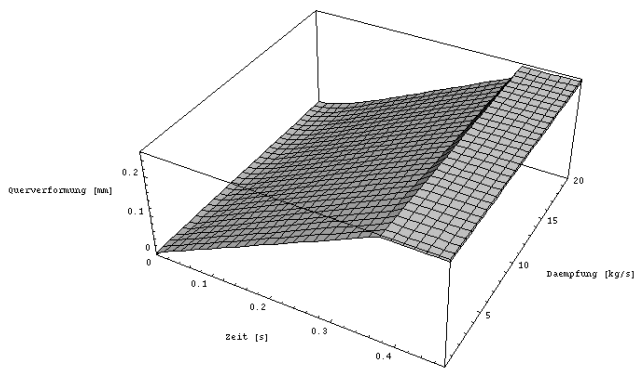
**Bild 7:** Entstehender Druck auf den Mantel in der ersten Lage bei einem Seildurchmesser  $d_s = 14$  mm und einer Zugkraft  $F_s = 20$  kN unter der Windung in der Position  $z_j$ , Mantellänge  $L = 500$  mm

Durch die Radialkraft nach Gleichung **Gl. (03)** verformt sich der Trommelmantel wie in **Bild 8** angezeigt.



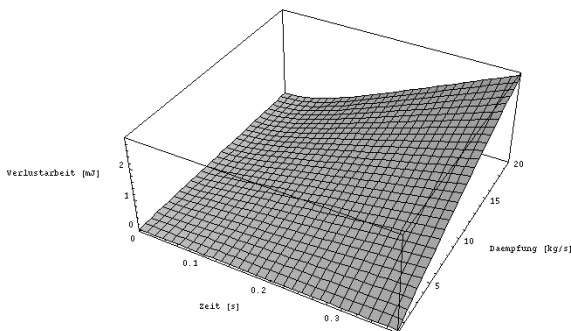
**Bild 8:** Mantelverformung unter dem Druck der Windung j

Das Seil verformt sich unter der Radialkraft  $F_{ri}(t)$  in Querrichtung. Da die Radialkraft erst nach der Zeit  $\vartheta_i/\omega$  ihren maximalen Wert erreicht, ergibt sich eine Zeitverzögerung in Abhängigkeit der Dämpfung bis zum Erreichen der maximalen Verformung. Das **Bild 9** stellt die Querverformung des Seiles in Abhängigkeit von der Dämpfung dar, wobei man bei hoher Dämpfung den Bogen in der Steigung der Querverformung sehr gut erkennt.



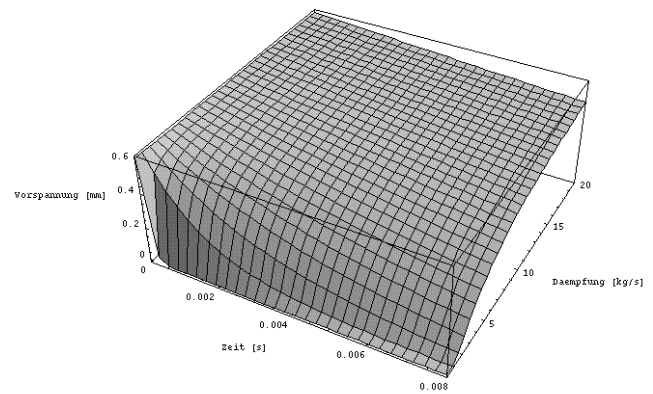
**Bild 9:** Seilverformung in der Querrichtung

Die Verzögerung der Verformung durch die Dämpfung induziert eine Verlustarbeit im Seil. Das **Bild 10** zeigt diese Verlustarbeit während der Aufwicklung einer Windung über den Winkel  $\vartheta_i$ . Man erkennt deutlich den Einfluss der Dämpfung in der Höhe dieser Verlustarbeit.



**Bild 10:** Verlustarbeit in dem Seilquerschnitt

Die Aufwicklung des Seiles in der Position  $z_j$  entlastet die Windung der Position  $z_{j-1}$ , der sogenannte Entlastungseffekt /3/. Beim Kunststoffseil hängt der Vorspannungsabfall im Seil von der Dämpfung ab und erfolgt genauso wie die Querverformung mit einer zeitlichen Verzögerung. Diese Zeitverzögerung kombiniert mit den physikalischen Eigenschaften des Seiles bzw. der Trommel (Oberflächegüte, Reibbeiwert) wird den Entlastungsvorgang des Kunststoffseiles anders als beim Stahlseil beeinflussen. **Bild 11** gibt das Abklingen der Seilvorspannung innerhalb einer Zeitspanne von 8 ms in Abhängigkeit von der Seildämpfung wieder für den Fall, dass das Seil nicht nachrutscht. Die Oberflächeneigenschaften des Seiles bzw. der Trommel, die Konstruktionsmerkmale zur Geometrie der Rillung, der Windungsabstand bzw. die Länge des Aufstiegs und des Parallelbereichs, werden über das Nachrutschverhalten des Seiles entscheiden.



**Bild 11:** Verlauf der Seilentlastung der Windung auf der Position  $z_{j-1}$  in Abhängigkeit von der Dämpfung

### 3 Zusammenfassung

Die hier ausgewerteten Diagramme zeigen, dass die Spannungen in Kunststoffseilen nicht in Phase mit den Verformungen bzw. Verzerrungen sind, sondern zeitlich verzögert. Dies bedeutet, dass ein Teil der geleisteten Arbeit bei der Seilverformung in Wärme umgesetzt wird. Im Gegensatz zu der Seiltrommel mit Stahlseilen muss man bei den Kunststoffseilen und der Gestaltung der Trommel die Seileigenschaften und die Trommeldrehgeschwindigkeit so aufeinander abstimmen, dass die Verlustarbeit keine große Erhöhung der Temperatur im System Seil-Trommel hervorruft. Dies sollte besonders beachtet werden, wenn es sich um mehrlagige Bewicklungen handelt.

### 4 Literatur

- /1/ N.N.; Kunststoffseile und Elektrostartwinde, Segelfliegen, 1/ 2004
- /2/ Fa. Schindler.: Geschäftsbericht 2000; Tätigkeitsbericht
- /3/ Dietz, P.: Ein Verfahren zur Berechnung ein- und mehrlagig bewickelter Seiltrommeln; Dissertation, TH Darmstadt, Darmstadt, 1971
- /4/ 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