

Einfluss einer mehrlagigen Bewicklung von Seiltrommeln mit Kunststoffseilen auf deren Gestaltung und Dimensionierung

Schwarzer, T.

Die bestehenden Dimensionierungs- und Auslegekriterien für Seiltrommeln basieren zurzeit ausschließlich auf dem mechanischen Verhalten von Drahtseilen. Um der Forderung nach einer weiteren Reduzierung des Gesamtgewichts von Seiltrieben nach zu kommen, sollen in Zukunft auch hochfeste Chemiefaserseile bei mehrlagiger Trommelbewicklung verwendet werden. Deren gegenüber dem Drahtseil stark unterschiedlichen Seileigenschaften verursachen eine gänzlich andere Trommelbeanspruchung. Aus diesem Grund müssen die bestehenden Berechnungsgrundlagen an den neuen Seiltyp angepasst werden.

The existing dimensioning and design criteria's for hoisting winches are based exclusively on the behaviour of steel wire ropes. In order to fulfil the further demands of reducing the total weight of winches, high-strength chemical fibre ropes are to be used for multi-layer winches in future. The strongly different rope characteristics opposite the wire rope cause completely different drum loads. For that reason the existing design fundamentals must be adapted to the new type of ropes.

1 Einleitung

Im Bereich der Seiltechnik werden hochfeste, synthetische Faserseile bislang fast ausschließlich als stehende Seile, wie z.B. Verankerungsseile, eingesetzt. Die gegenüber herkömmlichen Drahtseilen höhere Zugfestigkeit und das drei- bis achtfach geringere spezifische Gewicht prädestinieren die Kunststoffseile für den Einsatz als laufendes Seil in Leichtbaufördermitteln, speziell in mobilen Anwendungen. In **Tabelle 1** sind die Eigenschaften zweier synthetischer Fasern denen von Stahl gegenübergestellt.

	Dyneema SK60	Aramid LM	Stahl
Dichte (g/cm ³)	0,97	1,44	7,82
Zugfestigkeit (N/mm ²)	2700	2700	bis 2160
Elastizitätsmodul (N/mm ²)	87000	58000	200000
Bruchdehnung (%)	3,5	3,7	1,1

Tabelle 1: Kenndaten von Seilfasern /1/

Es liegen bis dato wenige Erkenntnisse und wissenschaftliche Untersuchungen zu laufenden Kunststoffseilen vor. Im Wesentlichen beschränken sich die bisher durchgeführten Untersuchungen auf die Ermittlung der Biegewechselzahl und die maximal zulässige Seilzugkraft beim Lauf des Seils über Seilrollen. Das Fehlen von abgesicherten Erkenntnissen über die, die Trommelbeanspruchung beeinflussenden Eigenschaften, wie z.B. das Quer- und das Längselastizitätsmodul, macht eine beanspruchungsgerechte und gewichtsoptimierte Auslegung derzeit noch nicht möglich. Selbiges gilt für das Spulverhalten der Kunststoffseile und die sich einstellende Seilpaketsteifigkeit bei einer mehrlagigen Bewicklung der Seiltrommel.

Ziel der laufenden Forschungsarbeiten am Institut für Maschinenwesen ist es, in analytischen und experimentellen Untersuchungen den Einfluss der geänderten Seileigenschaften auf die Trommelbeanspruchung zu ermitteln und die gewonnenen Erkenntnisse in die bestehenden Berechnungs- und Dimensionierungsgrundlagen zu integrieren /2,3/.

2 Zielsetzung Leichtbauseiltrieb – Optimierungsparameter

Die Beanspruchungen einer Seiltrommel werden im Wesentlichen durch den Druck der Seillagen auf den Trommelmantel und auf die Bordscheiben hervorgerufen. Die Höhe der Beanspruchungen wird dabei durch die Seileigenschaften, maßgeblich durch das Querelastizitätsmodul, beeinflusst. Grundsätzlich gilt folgender Zusammenhang: Die Belastung der Bordscheiben steigt mit abnehmendem Querelastizitätsmodul, während mit zunehmender Seilsteifigkeit, sprich mit einem zunehmenden Querelastizitätsmodul, die Last nahezu direkt auf den Mantel übertragen wird. Die Interaktion zwischen dem eine bestimmte Steifigkeit aufweisenden Seilpaket und der Seiltrommel sind bei der Entwicklung von Berechnungsmethoden keinesfalls losgelöst voneinander zu betrachten.

Bild 1 zeigt das Zusammenspiel und die gegenseitige Beeinflussung der Seil- und Trommeleigen-

schaften auf das Seilpaket und letztendlich auf die Beanspruchungsentwicklung.

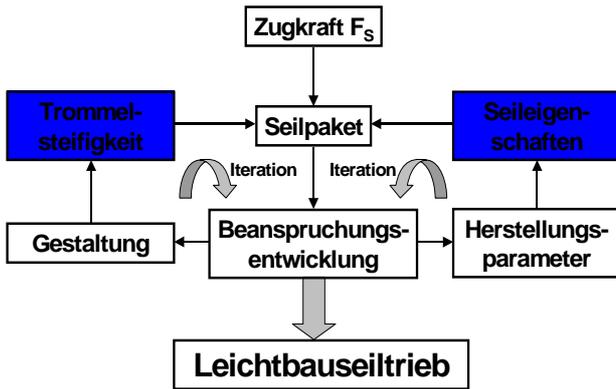


Bild 1: Zusammenspiel der auf die Beanspruchungsentwicklung einwirkenden Parameter

Zu den Optimierungsparameter zählen einerseits das Seilherstellungsverfahren mit Variation der Schlaglänge, der Schlagart, der Litzenanzahl, welche letztendlich das Seilpaketverhalten beeinflussen und andererseits Trommelparameter wie die Mantel- und die Bordscheibengeometrie und das Fertigungsverfahren, welche einen Einfluss auf die Trommelsteifigkeit haben.

Die Abstimmung der beschriebenen in **Bild 1** benannten Parameter aufeinander ermöglicht letztendlich die Entwicklung eines gewichtsoptimierten Seiltriebes.

2.1 Numerische Untersuchung des Einflusses variiert Seileigenschaften auf die Trommelbelastung

Um die Einflüsse auf eine mehrlagig mit einem Kunststoffseil bewickelte Seiltrommel abzuschätzen, wurden an einem vereinfachten FE-Modell numerische Untersuchungen mit variierten Seileigenschaften durchgeführt. Das verwendete Modell beschränkt sich auf eine Seiltrommel mit fünf idealisierten Seillagen, welche als rechteckiges Seilpaket angenommen bzw. dargestellt werden. Für eine konstante Seilzugkraft von $F_S = 20$ kN wurden dem vereinfachten Seilpaket unterschiedliche Kombinationen aus Quer- und Längselastizitätsmodul zugeordnet. Um bei diesen Modellbetrachtungen den Einfluss auf die Seiltrommelsteifigkeit zu berücksichtigen, wurden die Berechnungen mit verschiedenen Durchmesserhältnissen ausgeführt, wobei ein Verhältnis von Trommeldurchmesser D zu Seildurchmesser d von $D/d = 24$ und $D/d = 17$ simuliert wurde. Der Seildurchmesser wurde als konstant angenommen.

Bild 2 zeigt den Verlauf der sich einstellenden Bordscheibenverformungen für ein Durchmesser Verhältnis von $D/d = 24$ mit konstant gehaltenen Querelastizitätsmodul E_{SQ} bei veränderlichem Längselastizitätsmodul E_{SL} .

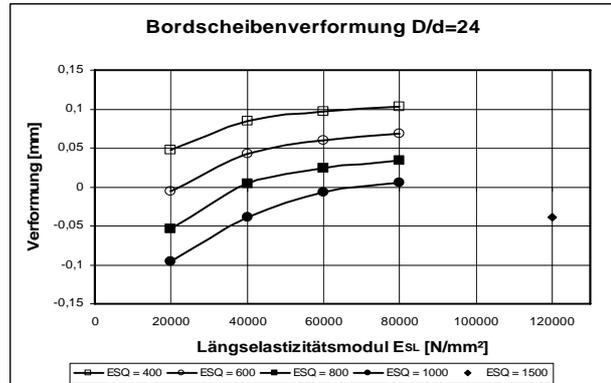


Bild 2: Bordscheibenverformung in Abhängigkeit vom Seillängselastizitätsmodul E_{SL}

Es ist zu erkennen, dass mit steigendem Seillängselastizitätsmodul E_{SL} für alle gewählten Seilquerelastizitätsmodule E_{SQ} eine degressive Zunahme der Bordscheibenverformung zu erkennen ist. Der Vergleich zwischen dem berechneten kleinsten und größten Querelastizitätsmodul E_{SQ} zeigt über dem Längselastizitätsmodul E_{SL} eine annähernde Verdopplung der Bordscheibenverformung. Einen identischen Verlauf weisen die Bordscheibenverformungen für den Fall mit dem kleineren Durchmesser Verhältnis von $D/d = 17$ auf, die auftretenden Verformungen sind für alle eingesetzten Querelastizitätsmodule E_{SQ} um den Faktor drei größer.

Für den Fall konstant gehaltener Längselastizitätsmodul E_{SL} bei veränderlichem Querelastizitätsmodul E_{SQ} wurden entsprechende Betrachtungen durchgeführt. **Bild 3** zeigt die berechneten Bordscheibenverformungen für das Durchmesser Verhältnis $D/d = 24$.

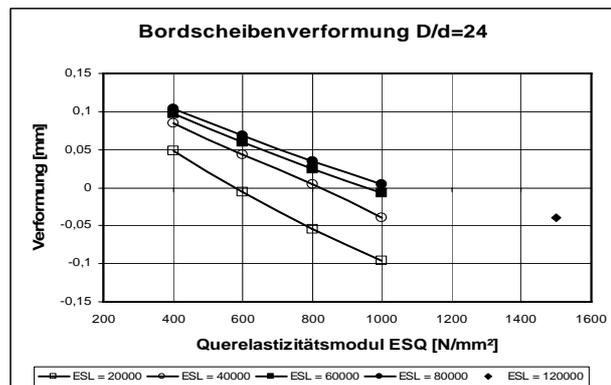


Bild 3: Bordscheibenverformung in Abhängigkeit vom Seilquerelastizitätsmodul E_{SQ}

Es lässt sich aus den Berechnungsergebnissen eindeutig ein linearer Zusammenhang zwischen der Bordscheibenverformung und dem Querelastizitätsmodul E_{SQ} erkennen. Die größten Verformungen ergeben sich (wie auch bei der Betrachtung mit einem veränderlichen Längselastizitätsmodul) für das kleinste berechnete Querelastizitätsmodul.

Die Verformungsverläufe für die Seiltrommel mit einem Durchmesser Verhältnis von $D/d = 17$ zeigen ein lineares Verhalten, entsprechend dem in **Bild 3** dargestellten Fall.

Um eine Aussage über die sich einstellende Bordscheibenbeanspruchung treffen zu können, wurde der Verlauf der radialen Biegespannung über dem Seillängselastizitätsmodul E_{SL} ausgewertet. Die auftretenden Biegespannungen für die beiden untersuchten Durchmesser Verhältnisse zeigen einen mit den Bordscheibenverformungen verwandten Verlauf. Die Kombination aus kleinstem Querelastizitätsmodul und größtem Längselastizitätsmodul ruft in diesem Fall die größten Bordscheibenverformungen und abhängig davon die größten Biegespannungen hervor. Der Einfluss der Trommelgeometrie bewirkt eine um $1/3$ größere radiale Biegespannung für das Durchmesser Verhältnis $D/d = 17$.

Die Untersuchungen zeigen, dass für ein Kunststoffseil (mit deutlich kleineren Werten für Längs- und Querelastizitätsmodul) die auftretenden Bordscheibenverformungen und radialen Biegespannungen in der Regel größer sind als bei der Verwendung eines herkömmlichen Drahtseils (vgl. **Bild 2** und **Bild 3**, Punkt bei $E_{SQ} = 1500 \text{ N/mm}^2$ und $E_{SL} = 1500 \text{ N/mm}^2$). Es ist außerdem festzuhalten, dass die entstehenden Beanspruchungen und Verformungen im Wesentlichen linear vom Querelastizitätsmodul abhängen. Bei verringertem Trommel- zu Seildurchmesser Verhältnis D/d steigt die Beanspruchung an.

2.2 Analytische Betrachtung der Kunststoffseileigenschaften

Kunststoffseile bringen gegenüber den Stahlseilen viele Vorteile mit sich, jedoch sind auch einige unsichere Eigenschaften zu berücksichtigen, die sich negativ auf die Verwendung als laufendes Seil bei mehrlagiger Seiltrommelbewicklung auswirken. Zum einen weisen Kunststoffseile im Vergleich zu Drahtseilen größere Dehnungen auf, zum anderen ist ihre Beständigkeit insbesondere im Dauerbetrieb und in Bezug auf die Ummantelung weitestgehend

unbekannt. Selbiges gilt für die Beständigkeit gegen verschiedene Umwelteinflüsse, wie z.B. UV-Einstrahlung, Hitze- und Kälteeinwirkungen sowie der Kontakt mit anderen Medien.

Bild 4 zeigt den Querschnitt eines ummantelten Aramid-Faserseils.

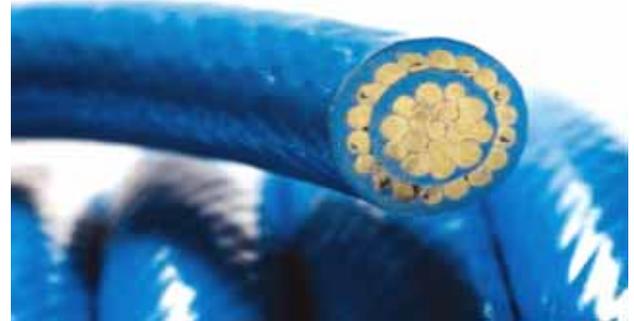


Bild 4: Aramid-Faserseil für Treibscheibenaufzüge, Firma Schindler

Das mechanische Ersatzmodell für die Bewicklung einer Seiltrommel mit einem Kunststoffseil (**Bild 5**) berücksichtigt im Gegensatz zum Stahlseilersatzmodell, welches das Seil vereinfacht als eine Feder annimmt, die vorhandenen Dämpfungseigenschaften des Kunststoffseils. Die Nachbildung erfolgt durch eine Feder-Dämpfer-Einheit, vgl. *Mupende /4/*.

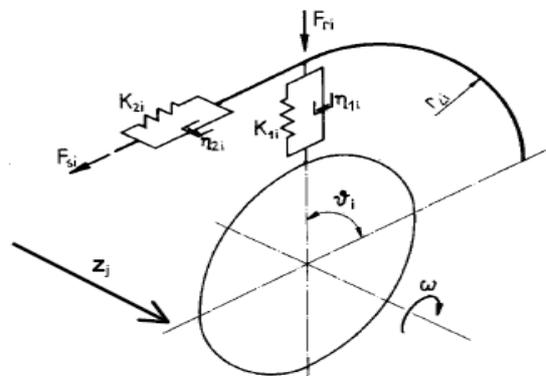


Bild 5: Ersatzmodell für die Bewicklung einer Seiltrommel mit einem Kunststoffseil

Die am Ersatzsystem angreifenden Kräfte sind die Seilzugkraft F_{si} und die Radialkraft F_{ri} . Entgegen der bisherigen Annahme der sofortigen Krafteinwirkung beim Stahlseil, wächst beim Kunststoffseil die Radialkraft F_{ri} über ein Zeitintervall erst auf ihren Maximalwert an. Somit unterliegt auch die sich einstellende Verformung des Seils in Querrichtung einer Zeitverzögerung, welche abhängig von der Dämpfung des Seils ist.

Das **Bild 6** zeigt die zeitliche Abhängigkeit der Seilquerverformung von der Dämpfung.

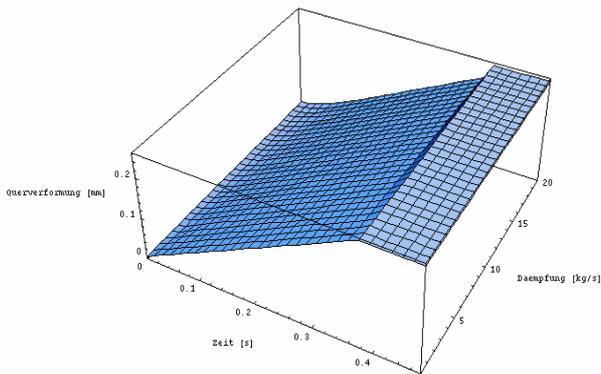


Bild 6: Abhängigkeit der Querverformung von der Seildämpfung

Die durch die Dämpfung hervorgerufene verzögerte Verformung des Seils induziert eine Verlustarbeit im Seil. Die vorhandene Dämpfung wirkt sich aber nicht nur in Seilquerrichtung sondern auch auf den Vorspannungsabfall und den damit verbundenen Entlastungseffekt aus. Betrachtet man den Fall, dass das Seil nicht nachrutscht ergibt sich dadurch auch eine zeitliche Verzögerung beim Abklingen der Seilvorspannung.

Diese hier genannten Eigenschaften der Kunststoffseile und die daraus resultierenden Änderungen im Belastungsverhalten des Seils, müssen bei der Trommelgestaltung und insbesondere bei einer mehrlagigen Bewicklung der Seiltrommel berücksichtigt werden.

3 Ausbau der Messtechnik am Seiltrommelprüfstand

Um die Qualität der Messsignalübertragung bei Online-Messung an rotierenden Prüfteilen und insbesondere bei den Messungen am Seiltrommelprüfstand zu verbessern, wurde dieses Jahr eine neue 32-kanalige Telemetrieanlage im Wert von 75.000 € angeschafft. Im Vergleich zur Vorgängeranlage bauen die Sender wesentlich kompakter und der vorher benötigte Multiplexer zur Übertragung der Messsignale ist in vielen Fällen überflüssig, was letztendlich die Flexibilität der Anordnung der Komponenten an den Bordscheiben der Seiltrommeln erhöht. Neben den 3 x 8-Kanal- und den 2 x 4-Kanal-Sendern mit den entsprechenden Empfängereinheiten, umfasst das Gesamtpaket auch einen 3-Kanal-ICP-Sender mit Empfänger für die Messung von Schwingbeschleunigungen an der sich bewegenden Struktur.

Bild 7 zeigt einige Komponenten der neuen Telemetrieanlage



Bild 7: Komponenten der neuen Telemetrie

4 Zusammenfassung

Die durchgeführten numerischen und analytischen Untersuchungen haben gezeigt, dass bei der Verwendung von Kunststoffseilen sich ein geändertes Beanspruchungsverhalten der Seiltrommel einstellt. So erhöht sich einerseits durch eine Reduzierung des Querelastizitätsmoduls die Beanspruchung auf die Bordscheiben, andererseits kommt es zu einer Entlastung des Trommelmantels. Weiterhin wird durch den Dämpfungsanteil in den Kunststoffseilen eine Verlustarbeit induziert, welche in Wärme umgesetzt wird. All diese Effekte müssen in die Auslegungsgrundlagen von Seiltrommeln einfließen. Außerdem müssen die hier festgestellten Effekte durch experimentelle Untersuchungen belegt werden. Die neue Telemetrie wird bei den durchzuführenden Beanspruchungsanalysen von Seiltrommeln die Applikation der Messtechnik und die Messwert-erfassung wesentlich vereinfachen.

5 Literatur

- /1/ Jacobs, M.; Dingenen, J.: Zugkräftig. Leichtfasern für Hochleistungsseile. Draht Welt Heft 3, 1991
- /2/ Dietz, P.: Ein Verfahren zur Berechnung ein- und mehrlagig bewickelter Seiltrommeln; Dissertation, TH Darmstadt, Darmstadt, 1971
- /3/ 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
- /4/ Mupende, I.: Einfluss der Seildämpfung auf die Trommelbelastung bei Bewicklung mit Kunststoffseilen oder Kunststoff – Stahl Seilen; Institutsmitteilung Nr. 29, IMW Clausthal, 2004