

Die Eigenschaften neuer Seilkonstruktionen zur Realisierung von Leichtbauseiltrieben



Dietz, P.; Schwarzer, T.

In nahe liegender Zukunft sollen Kunststoff- und Hybridseile in Leichtbaukonstruktionen bei einer mehrlagigen Bewicklung der Seiltrommel eingeführt werden. Dies erfordert Begleitmaßnahmen im Auslegungskonzept und in der Gestaltung der Trommel, da die Eigenschaften solcher Seile gänzlich unterschiedlich zu denen von Drahtseilen sind.

In the near future chemical fibre- and hybridropes are going to be implemented in the construction of lightweight multilayer winches. This application necessitates measures in existing dimensioning concept and calculation of such winches, due to the strongly different rope characteristics.

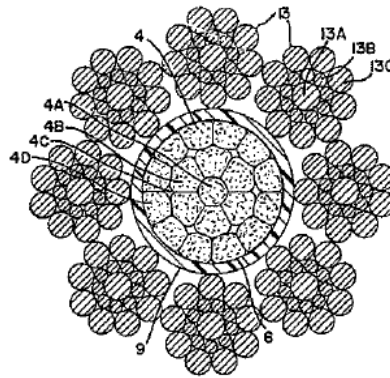
1 Einleitung

Im Maschinen- und Anlagenbau geht die Tendenz aufgrund des Kosten- und Termindrucks dahin, bereits so viele Einzelkomponenten wie möglich vormontiert anzuliefern und aufzubauen. Dies hat zur Folge, dass Kranhersteller den Anforderungen nach stetig steigenden Hakenlasten und Auslegerreichweiten nachkommen müssen. Da aber gerade im mobilen Anwendungsbereich eine hohe Flexibilität unabdingbar ist, bedeutet dies letztendlich für die Gestaltung und Dimensionierung von Seiltrommeln, die Realisierung größerer Seilzuglasten und Seilspeicherlängen bei gleichzeitiger Reduzierung des verfügbaren Bauraums. Diese Anforderungen können aber nur mit ausreichend und beanspruchungsgerecht dimensionierten, mehrlagig bewickelten Seiltrommeln erreicht werden. In diesem Zusammenhang sollen Kunststoff- und Hybridseile zum Einsatz kommen, die ein um ein Vielfaches geringeres Eigengewicht aufweisen, damit ein Leichtbauseiltrieb noch realisierbar ist.

2 Mögliche Seilkonstruktionen

Im Aufbau des Seils können verschiedene Ansätze verfolgt werden, welche von reinen Faserseilen mit einem Kunststoffmantel zum

Schutz vor mechanischen Beschädigungen, bis hin zu Misch- oder Hybridkonstruktionen gehen. Reine Faserseile sind nicht robust genug um den mechanischen Anforderungen während der Installation und des Betriebs standzuhalten, besonders im Fall einer mehrlagigen Trommelbewicklung. Eine mögliche Lösung hierfür können die so genannten Hybridkonstruktionen sein. Sie kombinieren die Robustheit eines Stahlseils mit den gewichtsreduzierenden Eigenschaften von Faserseilen. In der Regel bestehen diese Seilkonstruktionen aus einem Faserkern, der durch Drahtaußenlitzen geschützt wird. In **Bild 1** ist ein solcher Seilaufbau dargestellt.



4 - Kevlar®-Kern und Kernelemente, 6 - Fasermantel, 9 - Kernschutzmantel, 13 - äußere Drahtlitzen

Bild 1: Beispielhafter Aufbau einer Hybridkonstruktion aus einem US-Patent /1/

3 Messung der Seileigenschaften

Die Kenntnis der Seileigenschaften ist für eine hinreichend genaue Dimensionierung einer Trommelgeometrie von großer Bedeutung, da das Längs- und das Querelastizitätsmodul des verwendeten Seils einen großen Einfluss auf die Seilpaketsteifigkeit und somit auch auf die Belastung der Trommel haben. Dies gilt insbesondere für eine mehrlagige Bewicklung. Im Rahmen eines laufenden Forschungsvorhabens der DFG wurden am Institut für Maschinenwesen zwei dieser oben angeführten Hybridkonstruktionen auf dem Seilzugprüfstand (**Bild 2**) hinsichtlich ihrer Eigenschaften untersucht. Es wurden Messungen unter verschiedenen Längs- und Querkraftverhältnissen sowie unterschiedlicher Lagenanzahl und Anordnung gefahren, um den jeweiligen Einfluss auf die sich einstellenden Eigenschaften zu ermitteln.

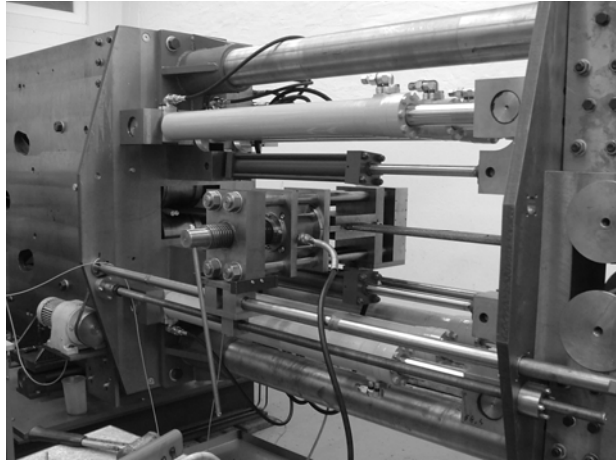
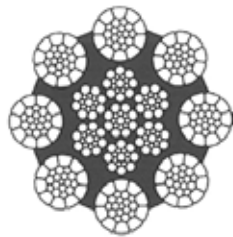


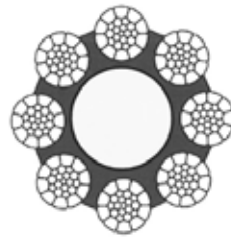
Bild 2: Seilzugprüfstand

3.1 Versuchsseile

Die untersuchten Hybridseile basieren auf der Turboplast-Konstruktion der Firma CASAR (**Bild 3**). Es handelt sich hierbei um eine weit verbreitete Konstruktion für Hubseile, da es eine gute Flexibilität aufgrund der 8 Außenlitzen mit einer hohen Verschleißfestigkeit durch die Verdichtung dieser Litzen kombiniert. In Anlehnung an die Standardvariante (a), die nur mit Stahldrähten und Litzen ausgeführt ist, wurde bei den Hybridvarianten (b) der Seilkern durch einen Faserkern ersetzt. Die Querschnittsfläche dieses Kerns beträgt rund 25% des Gesamtquerschnitts.



(a) Standard Turboplast



(b) Hybrid Turboplast

Bild 3: Querschnitt einer Standard Turboplast und einer Hybrid Turboplast Konstruktion /2/

Die zwei untersuchten Varianten haben denselben Aufbau, unterscheiden sich aber im verwendeten Fasermaterial des Kerns. Bei dem verwendeten Material handelt sich um Aramid-Fasern mit unterschiedlichen mechanischen Eigenschaften. Diese Fasern besitzen eine sehr hohe Zugfestigkeit in Verbindung mit einer geringen Dehnung und einer geringen Dichte. Im Vergleich zu einem üblichen Seildraht sind die Kennwerte der beiden eingesetzten Fasertypen in **Tabelle 1** dargestellt. Das Hauptunterscheidungsmerkmal liegt im E-Modul der jeweiligen Faser.

Fasertyp	Zugfestigkeit [MPa]	Bruchdehnung [%]	E-Modul [GPa]	Dichte [g/cm ³]
Standard Modul (SM)	3250	3,7	75	1,44
Hohes Modul (HM)	3100	2,7	105	1,45
Draht (hochfest)	1770	2,6	200	7,85

Tabelle 1: Eigenschaften von Aramidfasern, im Vergleich zu den Eigenschaften eines typischen Seildrahts /2/

Als Vergleich für die ermittelten Kennwerte dienen zwei im Kranbereich verwendete Seilkonstruktionen; zum einen ein PDD 1315 CZ und zum anderen ein PC EUROLIFT. Hierbei handelt es sich um reine Drahtseile mit einer unterschiedlichen Seilkonstruktion. Alle Seile haben einen Nenndurchmesser von 23mm und eine Mindestbruchkraft F_{\min} in Abhängigkeit der jeweiligen Konstruktion im Bereich von 410 kN bis 490 kN.

3.2 Versuchsparameter

Zu den während der Versuche variierten Parametern zählen:

- Längsspannungsverhältnis $k_L = 0,1; 0,2; 0,3$
mit $\sigma_L = k_L \cdot \sigma_N$ (1)
 σ_L Zugspannung im Seil
 σ_N Nennfestigkeit des Drahts
- Querspannungsverhältnis $k_Q = 0,07; 0,1$
mit $\sigma_Q = k_Q \cdot \sigma_L$ (2)
 σ_Q Querspannung im Seil

- *Lagenanzahl und Anordnung*
1-4 Lagen, Säulen- und Pyramidenanordnung

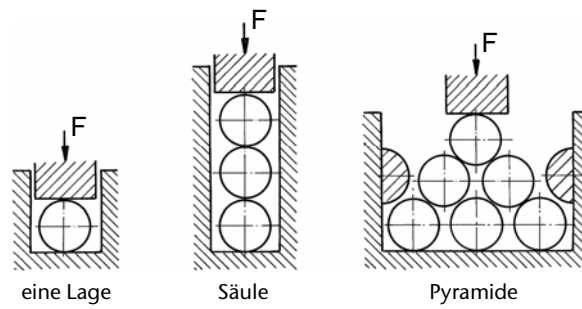


Bild 4: Untersuchte Seilanordnungen /3/

4 Ergebnisse

Die dargestellten Auswertungen beziehen sich in erster Linie auf die Ermittlung des Seilquerschnittsmoduls E_{SQ} , da das Längselastizitätsmodul E_{SL} durch den Seilhersteller bei der Bestimmung der Bruchkraft ermittelt und angegeben wird. **Bild 5** zeigt das sich einstellende Querschnittsmodul in Abhängigkeit des Längsspannungsverhältnisses k_L bei einem konstanten Querspannungsverhältnis $k_Q = 0,07$.

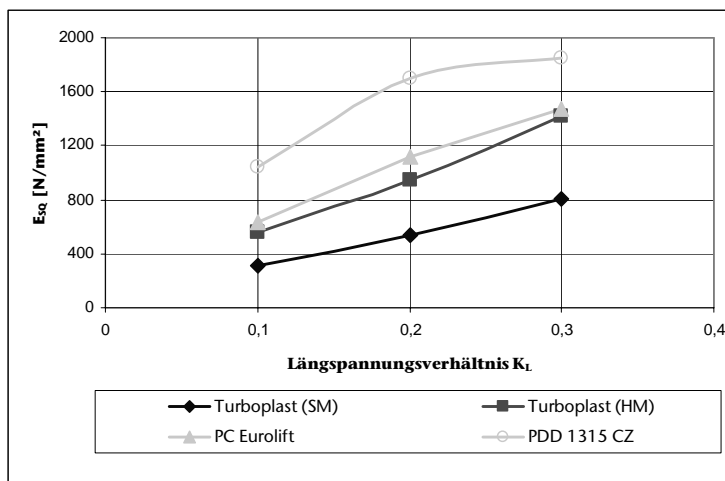


Bild 5: E_{SQ} in Abhängigkeit von k_L ; $k_Q = 0,07$; 1. Lage

Das Diagramm stellt für alle untersuchten Seile einen Anstieg des Querelastizitätsmoduls mit einer Erhöhung des Längsspannungsverhältnisses, sprich einer Erhöhung der Seilzugkraft, dar. Die Hybridkonstruktion mit dem Faserkern (SM) weist bei allen Messungen das geringste Quermodul auf. Das Quermodul des Seils mit dem hochmoduligen Faserkern (HM) ist bei allen Messpunkten um das 1,5-fache größer als bei der Standardvariante. Herauszustellen ist die Tatsache, dass die Hybridkonstruktion (HM) von den ermittelten Quermodulen im Bereich der PC Eurolift-Konstruktion liegt ($k_Q = 0,07$), welches eine reine Drahtseilkonstruktion ist. Das PDD 1315 CZ zeigt im Vergleich zum Eurolift eine wesentlich höhere Quersteifigkeit.

Die Abhängigkeit des Seilquerelastizitätsmoduls vom Längsspannungsverhältnis k_L bei einem konstanten Querspannungsverhältnis $k_Q = 0,1$ ist in **Bild 6** dargestellt.

Aus den ermittelten Quermodulen bei diesem Querspannungsverhältnis ist ein nahezu identischer Verlauf wie in der vorherigen Darstellung zu erkennen. Aufgrund der höheren Vorspannung in Längsrichtung und einer damit einhergehenden Verdichtung des Seilquerschnitts, liegen die hier bestimmten Querelastizitätsmodule in einer Größenordnung von 25-35% über denen bei einem Querspannungsverhältnis von $k_Q = 0,07$. Besonders herauszustellen ist in diesem Fall die Annäherung der Quermodule der beiden Drahtkonstruktionen und der Hybridkonstruktion (HM).

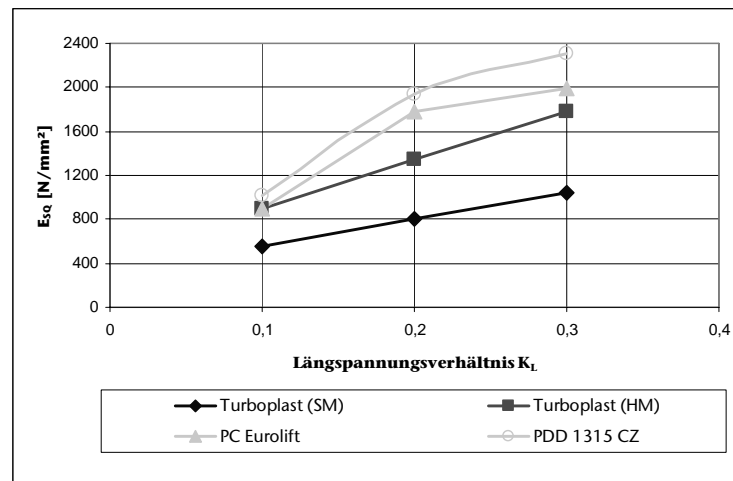


Bild 6: E_{SQ} in Abhängigkeit von k_L ; $k_Q = 0,1$; 1. Lage

Bild 7 zeigt das sich einstellende Quermodul in Abhängigkeit von der Lagenanzahl bei einem konstanten Querspannungsverhältnis $k_Q = 0,07$.

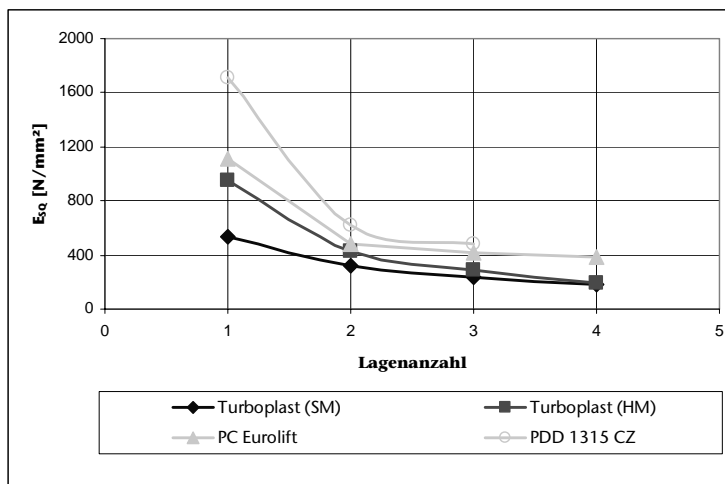


Bild 7: E_{SQ} in Abhängigkeit der Lagenanzahl; $k_L = 0,2$; $k_Q = 0,07$

Generell lässt sich bei der lagenbezogenen Darstellung des Querelastizitätsmoduls eine degressive Abnahme der Steifigkeit mit Erhöhung der Lagenanzahl feststellen, die sich in den höheren Lagenzahlen einem konstanten Wert annähern. Die Unterschiede in der Quersteifigkeit besonders in der ersten Lage werden mit zunehmender Lagenanzahl kleiner, so dass diese ab der dritten Lage nur in einem kleinen Bereich variieren.

Die Abhängigkeit des Seilquerelastizitätsmoduls von der Lagenanzahl bei einem konstanten Querspannungsverhältnis $k_Q = 0,1$ ist in **Bild 8** dargestellt. Aus den ermittelten Quermodulen bei $k_Q = 0,1$ ist auch in diesem Fall ein nahezu identischer Verlauf wie in der vorherigen Darstellung (**Bild 7**) zu erkennen. Festzuhalten ist in diesem Fall, dass die Quersteifigkeiten der beiden Hybridkonstruktionen im höheren Lagenbereich bei den beiden untersuchten Querspannungsverhältnissen nahezu identisch sind. Analog zu der Betrachtung mit einer Seilage bewirkt die höhere Vorspannung in Längsrichtung ein in den ersten zwei Lagen größeres Querelastizitätsmodul.

Die ermittelten Werte für die beiden Drahtkonstruktionen liegen in einem üblichen Bereich für einen solchen Seildurchmesser und Seilaufbau /3/,/4/.

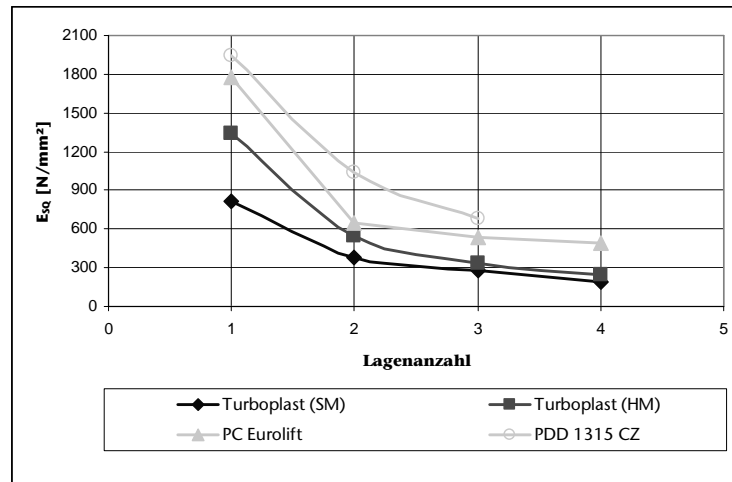


Bild 8: E_{SQ} in Abhängigkeit der Lagenanzahl; $k_L = 0,2$; $k_Q = 0,1$

Der Einfluss einer Pyramidenanordnung, welche der Seilanordnung im Parallelbereich einer LEBUS-Berillung entspricht, wird in Abhängigkeit vom Längsspannungsverhältnis für die Hybridkonstruktion mit hohem E-Modul (HM) in **Bild 9** dargestellt.

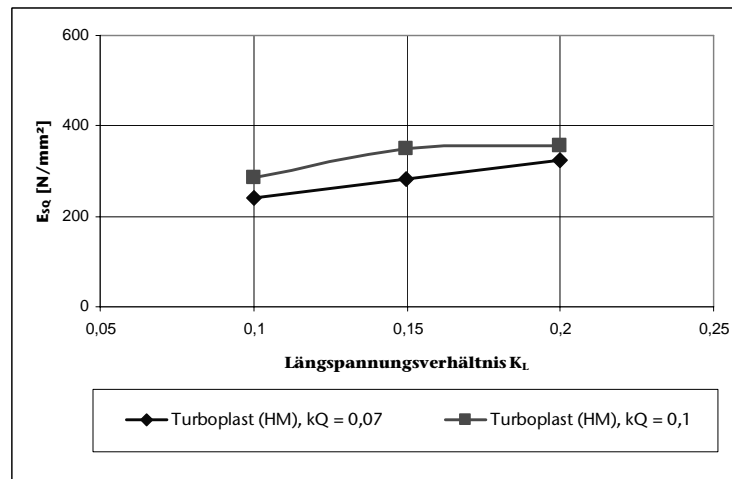


Bild 9: E_{SQ} in Abhängigkeit von k_L; Pyramidenanordnung

Die Darstellung zeigt ein ansteigendes Querelastizitätsmodul bei den gemessenen Längsspannungsverhältnissen. Vergleicht man die Werte bei einem Querspannungsverhältnis $k_t = 0,2$ mit denen für drei Lagen in Säulenordnung, so liegen die Steifigkeiten für die Pyramidenanordnung um rund 80 N/mm^2 über denen der Säulenordnung. Auch dieses Verhalten wurde in früheren Messungen /4/ festgestellt.

5 Zusammenfassung

Die allgemeinen Ausführungen verdeutlichen, dass Kunststoff- oder Hybridseile – als laufendes Seil – aufgrund ihres Gewichtsvorteils gegenüber Drahtseilen mit vergleichbarer Tragfähigkeit den Leichtbau im Bereich der Hebezeuge erheblich forcieren können. Für dieses Einsatzfeld liegen bis heute nur wenige wissenschaftliche Untersuchungen vor. Das Problem der Mehrlagenbewicklung einer Seiltrommel mit solchen Seilen wurde noch nicht bearbeitet.

Die durchgeführten experimentellen Untersuchungen zur Messung der Seileigenschaften haben gezeigt, dass sich bei der Verwendung solcher Seile, in diesem Fall für die beiden betrachteten Hybridkonstruktionen mit unterschiedlichem Faserwerkstoff, ein reduziertes Querelastizitätsmodul aufgrund des Faserkerns einstellt. Es ist aber auch ersichtlich, dass man durch die Wahl des Faserwerkstoffs in den Bereich normaler Drahtkonstruktionen kommen kann. Durch diese Eigenschaftsänderung stellt sich ebenfalls ein geändertes Beanspruchungsverhalten der Seiltrommel ein. 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. Alle diese Effekte müssen in die bestehenden Auslegungsgrundlagen für Seiltrommeln einfließen, welche letztendlich auch ein beanspruchungsgerechtes, gewichtsoptimiertes Trommeldesign bei der Verwendung von Kunststoff- oder Hybridseilen ermöglichen.

Derzeit erfolgen die weiteren Auswertungen der mit beiden Hybridseilkonstruktionen durchgeführten Trommelmessungen mit fünfzähliger Bewicklung (**Bild 10**), welche mit den Messungen für ein herkömmliches Drahtseil verglichen werden, um die in anderen Artikeln beschriebenen theoretischen Modelle zu validieren.

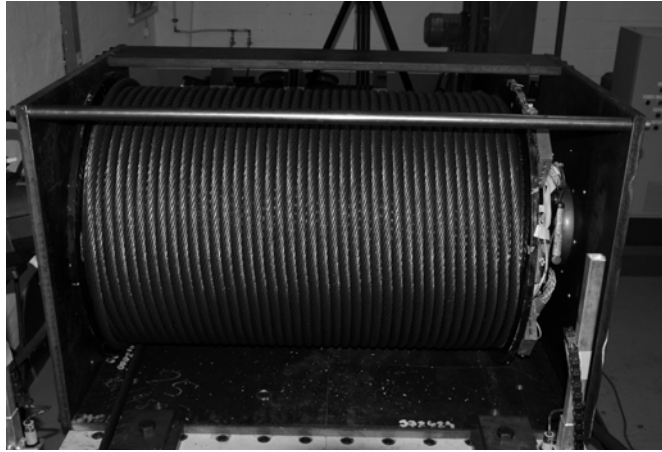


Bild 10: Hybridkonstruktion auf dem Trommelprüfstand

6 Literatur

- /1/ Klees, D.A.; Hoganson, R.B.; Data, H.L.: Rope with fibre and method of forming same, US Patent 4887422, 1989
- /2/ Ridge, I.M.L.; O’Hear, N.; Verreet, R.; Grabandt, O.; Das, C.A.: High strength fibre cored steel wire rope for deep hoisting applications, OIPEEC Conference Johannesburg 2007
- /3/ Mupende, I.: Beanspruchungs- und Verformungsverhalten des Systems Trommelmantel – Bordscheiben bei mehrlagig bewickelten Seiltrommeln unter elastischem und plastischem Werkstoffverhalten; Dissertation, TU Clausthal, 2001
- /4/ Henschel, J.: Dimensionierung von Windentrommeln; Dissertation, TU Clausthal, 2000
- /5/ Schwarzer, T.: Die Problematik der Auslegung mehrlagig bewickelter Seiltrommeln bei der Bewicklung mit Kunststoff- und Hybridseilen, Kranfachtagung Bochum, 2007