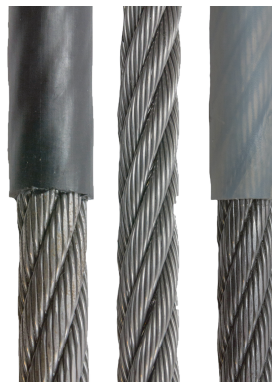


## Der Querelastizitätsmodul kunststoffummantelter Drahtseile

Stök, M.; Lohrengel, A.

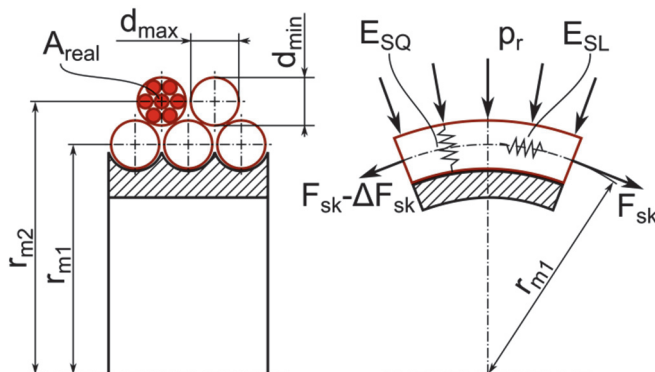
*In dem Forschungsprojekt „Lifetime Coated Ropes“ ist die Eignung kunststoffummantelter Drahtseile für die Mehrlagenwicklung untersucht worden. Eine wichtige Untersuchung war die Ermittlung des Querelastizitätsmoduls, sowie der Einfluss des Kunststoffmantels auf die Quersteifigkeit. Hier wird auf die Untersuchungsergebnisse des einlagigen Seils eingegangen.*



*In the research project "Lifetime Coated Ropes", the applicability of plastic-coated wire ropes for multi-layer spooling has been examined. An important part of the examination was the determination of the lateral modulus of elasticity, as well as the influence of the plastic coating on the lateral stiffness. Here we discuss the findings of the examination on single layer ropes.*

### Der Querelastizitätsmodul

Die Steifigkeitseigenschaften von Seilen in Längs- und Querrichtung unterscheiden sich erheblich, sodass zur Beschreibung der Querelastizitätsmodul ( $E_{SQ}$ ) und der Längselastizitätsmodul ( $E_{SL}$ ) zu ermitteln sind. Die beiden Elastizitätsmodule sind rechts in Abbildung 1 dargestellt.



**Abbildung 1:** Seil auf einer Seiltrommel /1/

Der Querelastizitätsmodul von Seilen wird durch viele Faktoren, wie der Außenlitzenanzahl, Verdichtung und dem Gebrauchszustand, beeinflusst. Bei Seilen mit besonders wenigen (vier) oder vielen (vierzehn, achtzehn) Außenlitzen ist die Quersteifigkeit höher als bei Seilen mit einer mittleren (sechs, acht) Anzahl an Außenlitzen. Verantwortlich dafür ist die innerhalb des Seils auftretende Reibung zwischen den Litzen. Während mit zunehmender Litzenanzahl die Reibung zunimmt, können bei besonders wenigen Litzen diese zuerst ableiten, bis eine weitere Kompaktierung des Seils nicht mehr möglich ist /2/.

Durch den helixförmigen Aufbau der Litzen und des Seils kommt es unter einer auf das Seil aufgetragenen Längskraft zu einer Verdichtung des Seils, wodurch die Reibung im Inneren zunimmt. Der Querelastizitätsmodul ist somit immer mit der bei der Ermittlung verwendeten Seilzugkraft  $F_{SK}$  anzugeben.

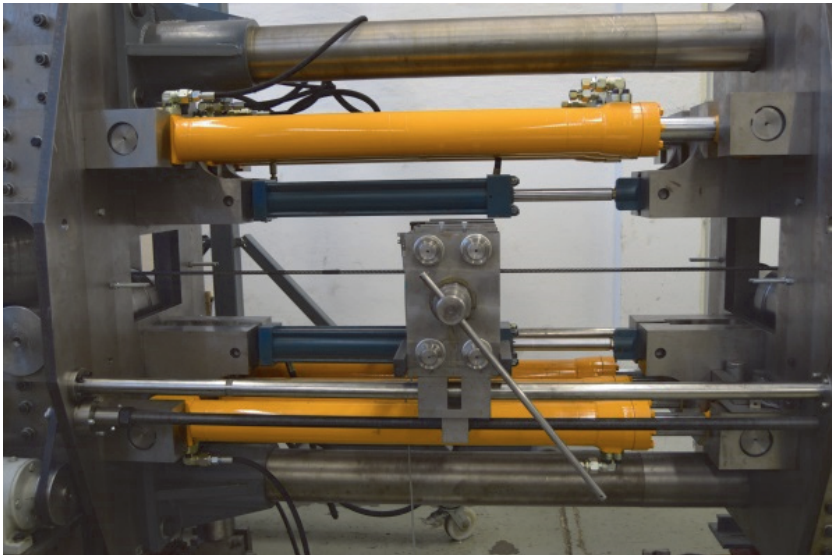
Für den Leichtbau von Seiltrommeln ist eine genaue Kenntnis der Lasten auf die Bordscheiben und den Trommelmantel notwendig. Nach /3, 4/ ist der Gesamtdruck auf den Trommelmantel die Summe der Drücke der einzelnen Seillagen des Wickelpaketes. Der Druck der einzelnen Lage ist von der Seilzugkraft und über Entlastungseffekte von den Steifigkeitseigenschaften des Seils in Längs- und Querrichtung abhängig.

Während des Wickelvorgangs werden die unteren Lagen des Wickelpaketes durch den Druck der oberen Lagen ( $p_r$ ) zusammengepresst. Abhängig von der Querelastizität des Seils verformen sich die unteren Lagen ( $d_{min}$  nimmt ab) des Wickelpaketes und der Wickeldurchmesser der Lage ( $r_{m1}$ ) verringert sich. Die Durchmesserreduktion hat einem Zugspannungsverlust in der Umschlingung zur Folge. Der Druck der unteren Lagen auf den Trommelmantel nimmt somit, aufgrund der Querverformung des Seils, ab.

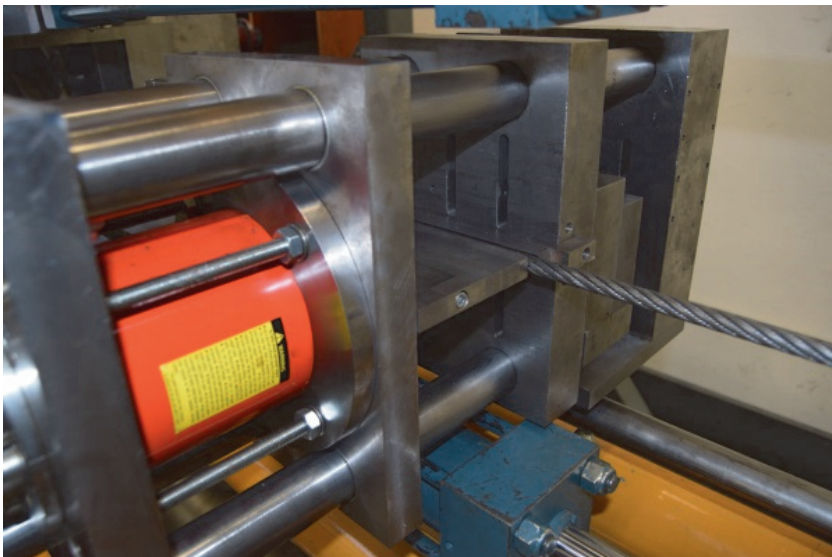
Für kunststoffummantelte Drahtseile sind in der Literatur bis jetzt keine Werte verfügbar um den Einfluss des Kunststoffmantels auf die Quersteifigkeit des Seils abschätzen zu können. Konstrukteuren, die einen Seiltrieb mit einem kunststoffummantelten Drahtseil auslegen sollen, fehlen somit die Information, wie stark der Entlastungseffekt auf aufgrund der Seildeformation ausfallen wird.

## Die Prüfung

Da die Quersteifigkeit eines Seils von der aufgetragenen Längskraft abhängig ist, wird die Querelastizität für unterschiedliche Längskrafthorizonte, zwischen 5 % und 30 % der Mindestbruchlast, bestimmt. Dazu wird mit dem in Abbildung 2 gezeigten Prüfstand die Längskraft auf das Seil aufgebracht. Mit dem in Abbildung 3 zu sehenden Hydraulikzylinder wird das Seil in Querrichtung belastet.

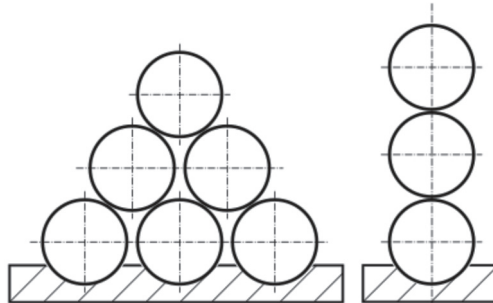


**Abbildung 2:** Der Querelastizitätsprüfstand mit dem Querprüfgerät /1/



**Abbildung 3:** Das Querprüfgerät

Auf dem Prüfstand können bis zu sechs Seile gleichzeitig eingespannt werden, um auch von Seilpaketen die Steifigkeit zu messen. Mit sechs Seilen können sowohl der Parallelbereich der Seiltrommel mit einer pyramidalen Anordnung der Seile nachgestellt werden, als auch der Kreuzungsbereich mit einer gestapelten Anordnung, wie sie in Abbildung 4 dargestellt sind.



**Abbildung 4:** Im Prüfstand mögliche Seilanordnungen als Pyramide (links) und als Stapel (rechts) /5/

Die Querkraft, mit der das vorgespannte Seil belastet wird, kann aus dem Verhältnis  $k_q$  der Querspannung  $\sigma_Q$  zur Längsspannung  $\sigma_L$  mit Gleichung (1) bestimmt werden.

$$k_q = \frac{\sigma_Q}{\sigma_L} \quad (1)$$

Das Spannungsverhältnis wird im üblichen Rahmen von 0,02 und 0,1 variiert und kann auch näherungsweise als das Verhältnis des Seildurchmessers zum Trommelmanteldurchmesser interpretiert werden. Aus den verschiedenen Längskrafthorizonten und dem variierten  $k_q$  ergibt sich für die Prüfung die in Tabelle 1 dargestellte Versuchsmatrix.

**Tabelle 1:** Versuchsmatrix für die Querelastizitätsprüfung

	$k_Q = 0,02$	$k_Q = 0,04$	$k_Q = 0,06$	$k_Q = 0,08$	$k_Q = 0,1$
$F_L = 0,05 \cdot MBL$					
$F_L = 0,1 \cdot MBL$					
$F_L = 0,2 \cdot MBL$					
$F_L = 0,3 \cdot MBL$					

Während der Prüfung werden die Deformation des Seils in Querrichtung und die aufgebrachte Querkraft aufgezeichnet. Aus diesen wird analog zur Bestimmung des Elastizitätsmoduls bei der Hooke'schen Gerade oder des Längselastizitätsmoduls bei Seilen, der Querelastizitätsmodul berechnet.

### Das kunststoffummantelte Drahtseil

Untersucht wurden zwei kunststoffummantelte Drahtseile, sowie das innenliegende Drahtseil ohne Kunststoffmantel. Die beiden Kunststoffe sind Polyethylene, der eine mit hoher und der andere mit niedriger Dichte. In Ihren mechanischen Eigenschaften, wie Elastizitätsmodul und Bruchdehnung unterschieden sich beide Kunststoffe.

Alle drei Seile sind mit der in Tabelle 1 dargestellten Prüfmatrix untersucht worden. Um den Einfluss des Kunststoffmantels auf die Steifigkeit zu verdeutlichen, ist die Steifigkeit der beiden untersuchten kunststoffummantelten Drahtseile (Seilvariante 1 und 2) im Verhältnis zum innenliegenden Drahtseil (Seilvariante 3) gesetzt worden. Die Steifigkeit des Drahtseils lag dabei im üblichen Rahmen. Die Ergebnisse sind in Tabelle 2 für den Kunststoff 1 und in Tabelle 3 für den Kunststoff 2 zusammengefasst.

**Tabelle 2:** Verhältnis des Querelastizitätsmodul Seilvariante 1 zu Seilvariante 3 /6/

$\frac{E_{SQ,Seilvar.1}}{E_{SQ,Seilvar.3}}$	$k_Q = 0,02$	$k_Q = 0,04$	$k_Q = 0,06$	$k_Q = 0,08$	$k_Q = 0,1$
$F_L = 0,05 \cdot MBL$	5,22	0,95	0,80	0,68	0,52
$F_L = 0,1 \cdot MBL$	0,87	0,53	0,59	0,65	0,70
$F_L = 0,2 \cdot MBL$	0,34	0,50	0,66	0,75	0,80
$F_L = 0,3 \cdot MBL$	0,56	0,63	0,60	0,55	0,61

Der Ausreißer ( $F_L 0,05 MBL$ ,  $k_Q 0,02$ ) bei der Seilvariante 1 wird bei der Auswertung nicht betrachtet. Für das kunststoffummantelte Seil mit dem Kunststoff 1 liegt die Steifigkeit des Stahlseils stets höher. Das kunststoffummantelte Drahtseil hat im Mittel lediglich 64 % der Steifigkeit des konventionellen Seils. Bei geringen Längs- und Querkraften sind die Steifigkeitsunterschiede jedoch geringer. Dies wird damit begründet, dass das Drahtseil aufgrund der geringen Längskraft in diesem Bereich ebenfalls noch recht weich ist.

**Tabelle 3:** Verhältnis des Querelastizitätsmoduls Seilvariante 2 zu Seilvariante 3 /6/

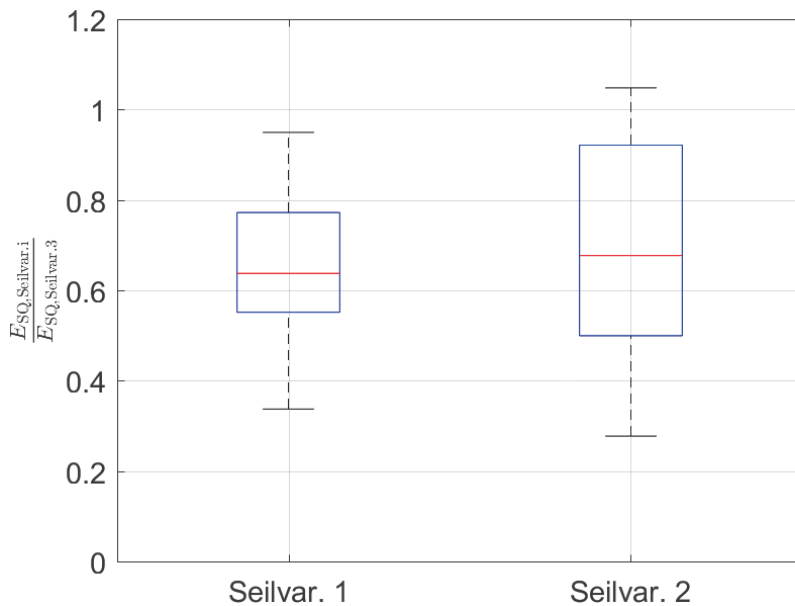
$\frac{E_{SQ,Seilvar.2}}{E_{SQ,Seilvar.3}}$	$k_Q = 0,02$	$k_Q = 0,04$	$k_Q = 0,06$	$k_Q = 0,08$	$k_Q = 0,1$
$F_L = 0,05 \cdot MBL$	0,70	0,95	0,66	0,37	0,28
$F_L = 0,1 \cdot MBL$	0,84	0,50	0,50	0,63	0,65
$F_L = 0,2 \cdot MBL$	0,32	0,51	0,76	0,91	0,97
$F_L = 0,3 \cdot MBL$	0,48	0,88	0,95	0,93	1,05

Für das Drahtseil mit den Kunststoffmantel 2 beträgt die Steifigkeit im Mittel 68 % vom konventionellen Drahtseil. Die Querelastizitätsmodule nähern sich bei diesem Seil bei sowohl geringen, als auch bei hohen Längs- und Querkräften an. Die Erklärung ist bei den geringen Längs- und Querkräften dieselbe, wie bei Kunststoff 1. Die Querelastizität des konventionellen Drahtseils ist aufgrund der geringen Längslast noch sehr gering und die Steifigkeiten vom Kunststoff und Seil liegen entsprechend nah beieinander. Bei den besonders hohen Längs- und Querkräften nähern sich die Steifigkeiten des kunststoffummantelten und des konventionellen Drahtseils an, weil der Kunststoff 2 eine geringere Streckspannung als Kunststoff 1 hat und bei den hohen Lasten aus dem Kontakt herausgedrückt wurde. Dies ist in Abbildung 5 zu sehen.



**Abbildung 5:** Der Kunststoff 2 wird bei den hohen Querlasten aus dem Kontakt gedrückt

Der Boxplot in Abbildung 6 stellt die Ergebnisse der Tabelle 2 und Tabelle 3 graphisch dar.



**Abbildung 6:** Boxplot des Vergleichs der Querelastizitätsmoduln der verschiedenen Seile /6/

### Zusammenfassung

Kunststoffummantelte Drahtseile liegen im Mittel mit 64 % bzw. 68 % unterhalb der Steifigkeit eines reinen Drahtseils. Bei geringer Längs- und Querkraft, sowie besonders hohen Längs- und Querkraften ist die Steifigkeiten jedoch nah beieinander. Für den Konstrukteur ist somit konservativ, bis weitere Forschungsarbeiten vorliegen, das reine Drahtseil zur Berechnung der Seiltrommel anzunehmen.

## Literatur

- /1/ Lohrengel, A.; Schulze, M.; Wächter, M. (2019): Finite element analysis of wire rope stiffness. In: M.A.R. Dohm (Hg.): Exploring Opportunities - Synthetic/Steel. Proceedings of the OIPEEC Conference 2019. Conference 2019. Den Haag, 12. 15. März. OIPEEC, S. 207–220.
- /2/ Henschel, J.: Dimensionierung von Windentrommeln, Verlag und Vertriebsgesellschaft mbH, Düsseldorf, 1999.
- /3/ Dietz, P.: Ein Verfahren zur Berechnung ein- und mehrlagig bewickelter Seiltrommeln; Dissertation, Technische Hochschule 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.
- /5/ Mann, L.; Dreblow, J.: Untersuchung der Auswirkung von Kunststoffummantelungen auf die Querelastizität von Drahtseilen, nicht veröffentlichte Projektarbeit TU Clausthal 2018
- /6/ Stök, M.; Schulze, M.; Rechnagel, T; Lohrengel, A., Schmidt, T.: Abschlussbericht Lebensdauer und Wickelverhalten kunststoffummantelter Drahtseile, AIF, 2020