

Das Seil unter Querbelastung – Querelastizitätsuntersuchungen am IMW im Vergleich zur Norm ISO 16839



Schulze, M.; Wächter, M.

Das Verformungsverhalten von (Draht-)Seilen unter Querkraft lässt sich sowohl nach der Norm ISO 16839 ermitteln als auch nach einer Methode, die am Institut für Maschinenwesen (IMW) eingesetzt wird. Die beiden Methoden haben unterschiedliche Ansätze zur Nachbildung der Situation des Seils in der Mehrlagenwicklung der Seiltrommel.

In diesem Artikel werden beide Methoden beschrieben und exemplarische Ergebnisse vorgestellt und verglichen. Weiterhin wird gezeigt in wieweit sich aus den Messwerten aus den ISO 16839 Versuchen die Querelastizität nach IMW Methode errechnen lässt.

The deformation of (wire-)ropes under lateral load can be examined in different ways. The first method is described in the ISO 16839. The second method is performed by the Institute of Mechanical Engineering (IMW). The setup of the rope in the multilayer spooling of the drum was reproduced in different ways.

The article describes the test procedures and gives examples of the results. Afterwards the results of the ISO 16839 tests will be compared to these of the IMW tests. Finally it is described if it is possible to transform the measured values from the ISO 16839 test to a lateral stiffness using the IMW method.

1 Einleitung

Es soll dargestellt werden, was es für Möglichkeiten gibt, die Verformung von Draht- und / oder Faser- und Hybridseilen unter Querkraft zu messen. Dazu wird auf die Berechnung der Verformung nach ISO 16839 /1/ und auf die Methode der Querelastizitätsermittlung am IMW eingegangen.

Für die Bestimmung der Belastungen und der daraus resultierenden Beanspruchungen von Seiltrommeln ist es notwendig, die Querelastizität der aufgespulten Seile zu kennen. Während der wichtige Seilpa-

parameter der Längselastizität in der Regel von den Seilherstellern ermittelt wird, ist die Querelastizität der Seile häufig unbekannt. Für den Festigkeitsnachweis einer Seiltrommel ist das Wissen sowohl um die Längs- als auch die Querelastizität von Nöten.

In beiden Verfahren wird nachgebildet, wie sich das Seil um die Trommel legt. Zu beachten sind dabei unterschiedliche Kontaktsituationen zwischen den Umschlingungen, wenn mehrlagig gespult wird. Dies folgt daraus, dass das Seil ab der zweiten Lage die Umschlingungen der vorherigen Lage kreuzen muss (Abbildung 1).

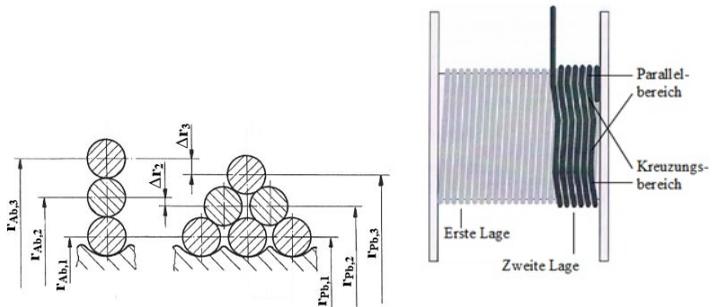


Abbildung 1: Kreuzungs- (links) und Parallelbereich (Mitte) im Querschnitt /2/ und auf der Seiltrommel (rechts) /3/

2 ISO 16839

Die ISO 16839 /1/ hat das Ziel, die Verformung von Drahtseilen in der Mehrlagenwicklung zu bestimmen.

Der Versuchsaufbau nach ISO 16839 bildet dazu die Situation des Seils im Parallelbereich nach. Abbildung 2 zeigt den Querschnitt des pyramidal aufgebauten Seilpaketes mit den Kontaktstellen zwischen dem Seil und den benachbarten Umwicklungen. Wie zu erkennen ist, wird der Druck an vier Stellen auf das betrachtete Seilstück übertragen.

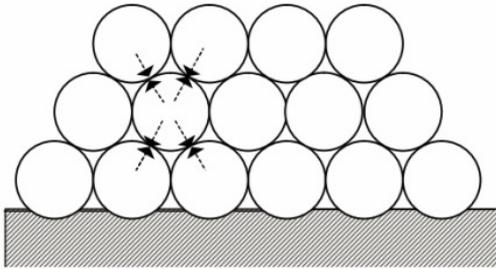


Abbildung 2: Seilquerschnitt mit Stellen der Kraftübertragung /1/

Um diese Kontaktsituation nachzubilden, sind Prüfbacken nach Abbildung 3 vorgeschrieben. Durch die V-förmige Nut wird das annähernd runde Drahtseil an den vier gewünschten Kontaktstellen berührt.

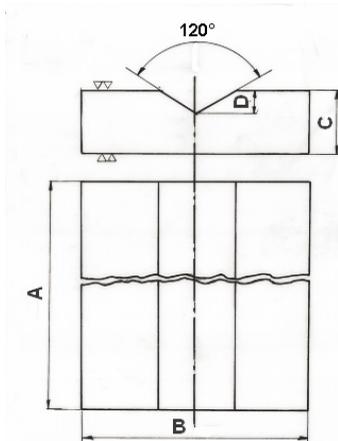


Abbildung 3: Prüfbacke nach ISO 16839 /1/

Den kompletten Versuchsaufbau zeigt Abbildung 4. Zwei der beschriebenen Prüfbacken werden gegenüberliegend an das Seil gelegt. Die Untersuchung findet ohne Längskraft im Seil statt.

Die maximale Querkraft F_Q , die auf das Seil aufgebracht werden soll, kann nach folgender Formel berechnet werden:

$$F_{Q-max} = \frac{P \cdot d_{nenn} \cdot A}{1000} [kN]. \quad 2.1$$

Dabei ist der Querdruck mit $P = 80\text{N/mm}^2$ anzunehmen. Der Seilennendurchmesser d_{nenn} und die Länge der Prüfbacken A (vgl. Abbildung 3) werden in mm angegeben.

Die errechnete Querkraft wird mindestens mit 10 Zyklen aufgebracht. Während der Aufbringung der Querkraft F_Q wird zum einen die Aufweitung des Seils in x Richtung gemessen. Dies muss an beiden Seiten des Seils erfolgen. Zum anderen wird gemessen, wie weit sich das Seil unter der Querkraft zusammendrückt.

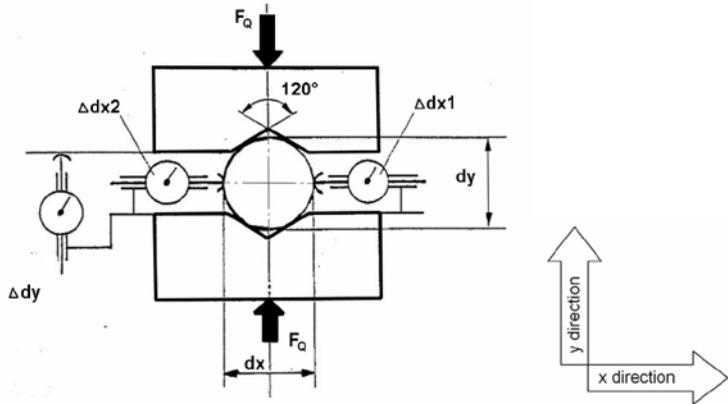


Abbildung 4: Versuchsaufbau nach ISO 16839 /1/

Als Ergebnis der Untersuchung kann der Verformungsgrad des Seils berechnet werden. Dazu werden zuerst die Istdurchmesser in x und y Richtung bestimmt:

$$dx = d_{nenn} + \Delta dx1 + \Delta dx2, \quad 2.2$$

$$dy = d_{nenn} - \Delta dy \quad 2.3$$

mit $\Delta dx1, \Delta dx2$ und Δdy den Messwerten der Wegaufnehmer.

Der Verformungsgrad berechnet sich daraus wie folgt:

$$V = \left(\frac{dx}{dy} - 1 \right) \cdot 100\%. \quad 2.4$$

2.1 Ergebnisse exemplarischer Versuche

Nach den Vorgaben der ISO 16839 wurden vier Seile mit einem Durchmesser von 32mm untersucht /4/. Die Prüfbacken wurden dazu entsprechend den Anforderungen gefertigt (vgl. Abbildung 3): $A = 200\text{ mm}$, $B = 96\text{ mm}$, $C = 32\text{ mm}$ und $D = 10,88\text{ mm}$.

Die Wegaufnehmer wurden bei 1% von F_{Q-max} genullt. Anschließend wurde die Querkraft ab 5% von F_{Q-max} in 5% Schritten erhöht.

Das Ergebnis ist so zu verstehen, dass ein hoher Wert bei der Verformung einer starken Veränderung der Istdurchmesser entspricht und somit einem elastischen Seil. Die Berechnung nach Formel 2.4 wird für jeden Schritt der Querkraft ausgeführt. Das Ergebnis ist in Abbildung 5 zu sehen.

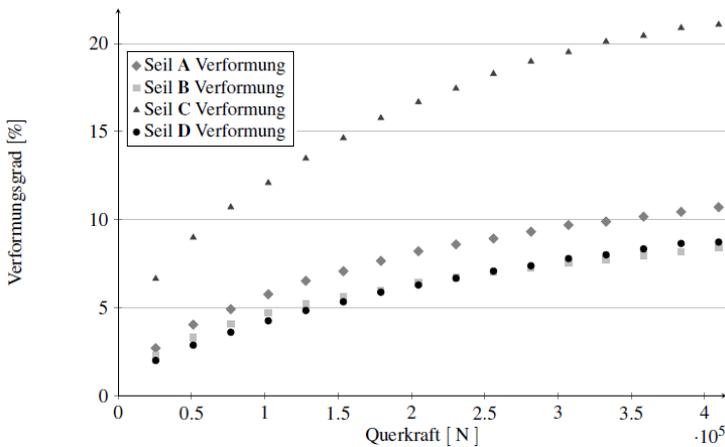


Abbildung 5: Verformungsgrad der untersuchten Seile /4/

Es zeigt sich, dass die Seile B und D sehr ähnliche Verformungseigenschaften aufweisen. Seil A hat eine etwas höhere Verformung, wohingegen Seil C eine deutlich erhöhte Verformung aufweist.

3 Quersteifigkeitsversuche am IMW

Die Quersteifigkeitsuntersuchungen am IMW haben zum Ziel, die Elastizität der Seile zu ermitteln. Dabei können Draht-, Faser- und Hybridseile untersucht werden. Ein wichtiger Aspekt bei der Untersuchung ist, dass die Seile mit der dem Einsatzfall entsprechenden Längskraft beaufschlagt untersucht werden.

Zu den Untersuchungen werden verschiedene Konfigurationen aus dem Seilpaket nachgebildet (Abbildung 6). Somit kann die Elastizität der Seile für den Parallel- und den Kreuzungsbereich ermittelt werden (vgl. Abbildung 6).

Für bekannte Seilkonstruktionen ist es später möglich, auf die vollständige Untersuchung zu verzichten und die Werte für Stapel- und Pyramidenanordnung aus dem Einzelversuch abzuleiten.

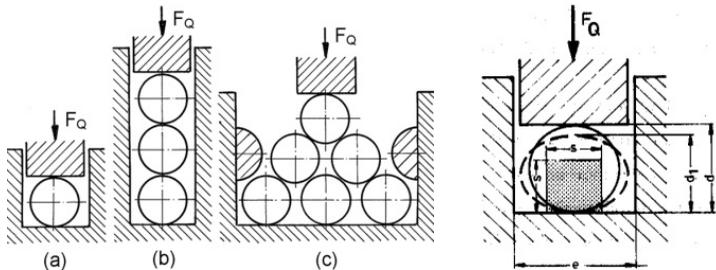


Abbildung 6: Quersteifigkeitsbestimmung am IMW: Einzelmessung (a), Stapel- (b) und Pyramidenkonfiguration, Verformung des Seils (rechts) Bilder aus /2/

Die Versuche werden je nach Einsatzfall mit einer Rillengeometrie nach DIN 15020 oder ohne durchgeführt. Der Stempel ist in jedem Fall glatt. Es besteht die Möglichkeit, seitliche Führungen einzusetzen (Abbildung 7).

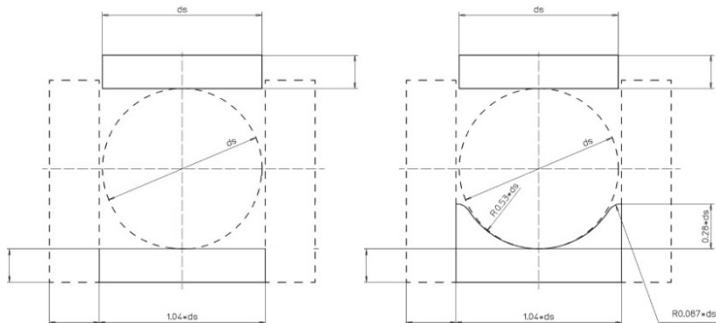


Abbildung 7: Prüfbacken ohne (links) und mit Rillung nach DIN 15020 (rechts)

Der Versuch wird wie in Abbildung 6 (rechts) dargestellt durchgeführt. Es wird die Querkraft F_Q aufgebracht und die entsprechende Verringerung des Seildurchmessers gemessen.

Die Querelastizität kann anschließend aus dem Verhältnis von Querkraft und Durchmesser unter Berücksichtigung der Länge der eingesetzten Prüfbacke berechnet werden:

$$E_{SQ} = \frac{\Delta F_Q}{\Delta d \cdot l_{mess}} \quad 3.1$$

In Abbildung 8 sind der stationäre Prüfstand des IMW und das mobile Gerät zur Ermittlung der Querelastizität abgebildet.

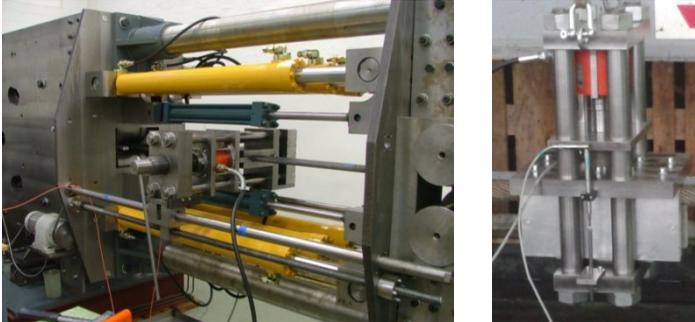


Abbildung 8: Stationärer Querelastizitätsprüfstand (links) und mobiles Querelastizitätsprüfgerät (rechts)

3.1 Exemplarische Versuche

Zur Durchführung von Querelastizitätsversuchen nach IMW Methode sind zuerst die Längs- und Querkräfte festzulegen. Entweder kann das entsprechende Seil unter den Bedingungen eines speziellen Einsatzfalles untersucht werden, oder es kann eine breitere Untersuchung durchgeführt werden. Dazu sollten verschiedene Längs- und Querkräfte mit Hilfe einer Prüfmatrix ausgewählt werden.

Für die Längskräfte wurden im vorliegenden Beispiel Kräfte von 5%, 10%, 20% und 30% der Mindestbruchkraft (MBF) angenommen /4/. Die Querkräfte können mit Hilfe des Querkraftverhältnisses aus Querspannung zu Längsspannung bestimmt werden:

$$k_Q = \frac{\sigma_Q}{\sigma_L} = \frac{2\sqrt{A}}{D} \quad 3.2$$

Dabei entspricht A dem metallischen Querschnitt (bei Drahtseilen) und D dem Trommeldurchmesser.

Aus üblichen Werten für k_Q lassen sich so die Querkräfte von 10%, 30%, 50%, 70% und 90% der Längskraft ermitteln. Daraus folgt diese Prüfmatrix (Abbildung 9).

	k_Q	0,012	0,037	0,061	0,086	0,11
Querkraft		10%	30%	50%	70%	90%
Längskraft		Längskraft	Längskraft	Längskraft	Längskraft	Längskraft
	5% Mindestbruchkraft					
	10% Mindestbruchkraft					
	20% Mindestbruchkraft					
	30% Mindestbruchkraft					

Abbildung 9: Beispiel einer Prüfmatrix

Die angegebene Längskraft wird für die Versuche auf das Seil aufgebracht. Die gewünschte Querkraft wird anschließend mit mehreren Zyklen aufgebracht, um eine Beeinflussung der Messergebnisse durch Setzeffekte zu vermeiden.

Als Beispiel wird das Ergebnis von Seil A in Abbildung 10 gezeigt.

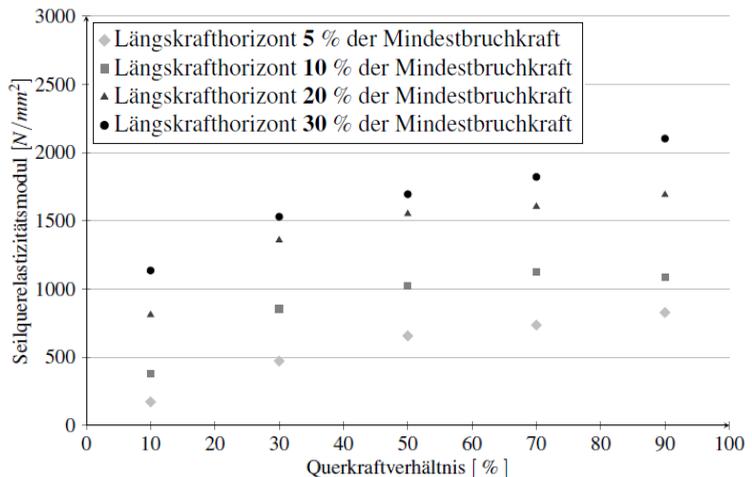


Abbildung 10: Querelastizität von Seil A /4/

Es ist zu erkennen, dass die Quersteifigkeit sowohl mit der Erhöhung der Längskraft als auch mit der Erhöhung der Querkraft zunimmt.

Zum Vergleich der vier Seile wird der 20% Längskrafthorizont (Anteil an der Mindestbruchkraft) betrachtet (Abbildung 11). Es zeigt sich, dass Seil B eine vergleichsweise hohe Steifigkeit hat. Seil D liegt meist im unteren Bereich der vier Seile. Seil A und C liegen je nach Querkraft dazwischen.

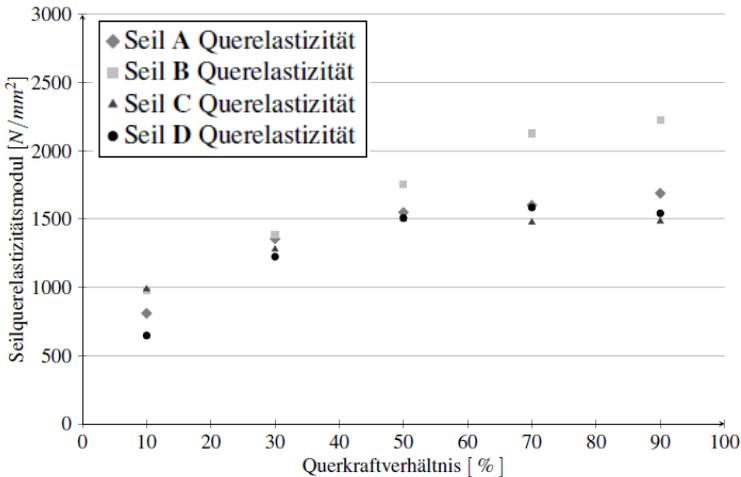


Abbildung 11: Quererelastizität der Seile A, B, C und D bei 20% MBF /4/

4 Vergleich beider Methoden

Da für die Berechnung der Belastung von Seiltrommeln eine Quersteifigkeit des Seils in N/mm^2 benötigt wird, werden die Versuche, die nach der ISO 16839 durchgeführt wurden, auch nach der Methode des IMW ausgewertet.

Eine Längskraft war bei den Versuchen nach ISO 16839 nicht vorhanden und muss daher vernachlässigt werden. Sie wird jedoch fiktiv angenommen, um die Querkraft festzulegen, die untersucht werden soll. Dazu wird ein Wert von 20% der MBF des Seils angenommen, da dies ein üblicher Wert beim Einsatz von Seilen ist.

Für das Seil A bedeutet dies einen Wert von 203,8 kN.

Für die Querkraft werden davon die Anteile entsprechend der Prüfmatrix (Abbildung 9) gewählt. Das bedeutet in diesem Fall Werte von 30%, 50%, 70% und 90% der fiktiven Längskraft.

Die Werte der Querkraften sind nicht genau im Testprogramm nach ISO 16839 enthalten gewesen, weshalb hier die jeweils benachbarten Kräfte angeschaut werden. Für Seil A kann der Wert für die 30% Querkraft aus den 10% und 15% Anteilen von F_{Q-max} , 51,2 kN und 76,8 kN errechnet werden. Die Auswertung ist möglich, weil für die Kräfte auch die Verformungen in Kraftrichtung Δy bekannt sind. Die Elastizität kann somit nach Formel 3.1 berechnet werden, da die Messlänge ebenfalls bekannt ist (Abbildung 12).

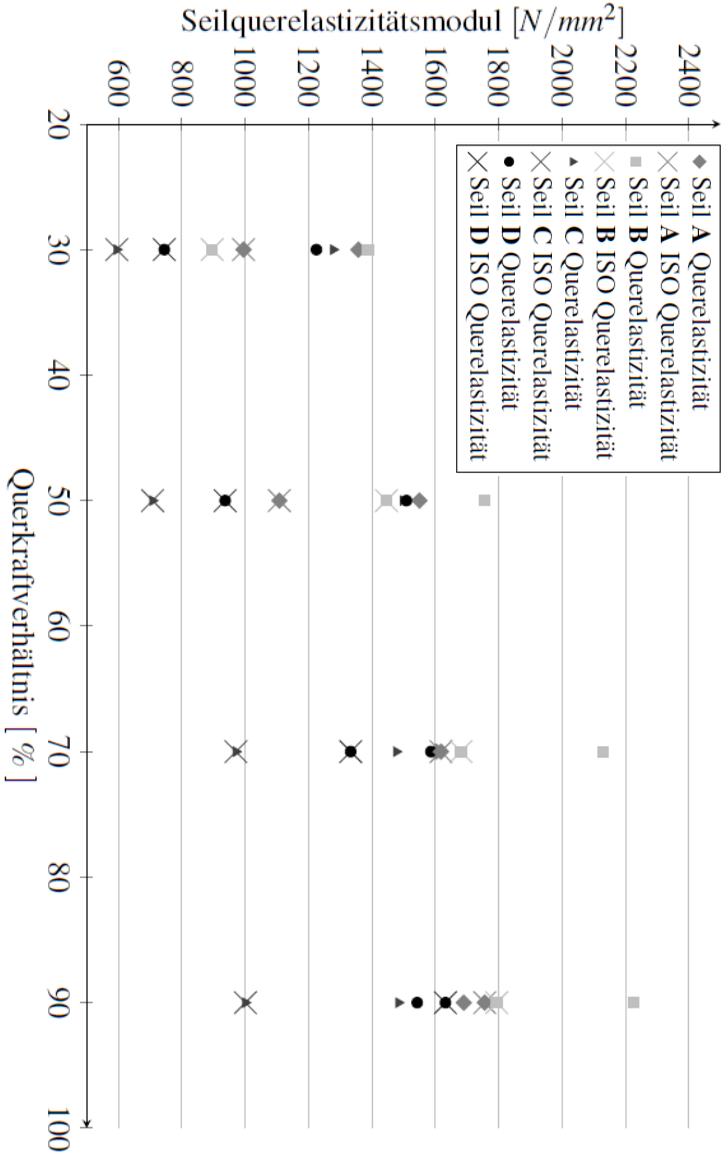


Abbildung 12: Vergleich der Querelastizitäten nach IMW Methode und Auswertung der ISO 16839 Versuche nach IMW Methode /4/

Die Ergebnisse können nur für jedes Seil einzeln verglichen werden, weil sich keine einheitlichen Tendenzen abzeichnen.

Beim **Seil A** liegen die nach ISO ausgewerteten Ergebnisse zuerst deutlich niedriger als nach IMW Methode. Bei höheren Querkräften liegt jedoch der Wert nach ISO 16839 höher.

Die Ergebnisse nach ISO 16839 von **Seil B** liegen immer unterhalb von den Werten nach IMW Methode. Es zeigt sich jedoch ein ähnlicher Verlauf.

Für das **Seil C** ergeben sich durch die Auswertung der ISO 16839 Versuche mit der IMW Methode im Vergleich zu den Versuchen nach IMW Methode deutlich niedrigere Werte für die Querelastizität.

Das **Seil D** wiederum zeigt ein vergleichbares Verhalten wie das Seil A. Bei niedrigeren Querkräften liegt die Querelastizität deutlich unter den Werten nach IMW Methode, und bei höheren liegt der Wert nach ISO 16839 höher.

Dass der Vergleich der Ergebnisse bei allen Seilen unterschiedlich ausfällt, liegt an den unterschiedlichen Bedingungen. Während bei der IMW Methode die Kräfte auf die jeweilige MBF bezogen werden, werden bei den Versuchen nach ISO 16839 immer die gleichen Kräfte aufgebracht. Dieser Unterschied zeigt sich besonders deutlich bei Seil C. Die hier besonders großen Unterschiede sind womöglich auf die geringere MBF des Seils zurückzuführen. Außerdem stehen bei der Auswertung, wie schon erwähnt wurde, nicht die exakt gleichen Werte zur Verfügung. Dadurch wird zwischen abweichenden Werten gemittelt, wodurch eine zusätzliche Abweichung verursacht wird.

Dass die Werte aus dem Versuchsaufbau nach ISO 16839 zumeist niedriger sind, lässt sich durch das Fehlen der Längskraft erklären. Das dies jedoch zum Teil nicht so stark ausgeprägt ist oder der Wert aus dem ISO 16839 Versuchsaufbau sogar höher liegt, könnte auf die Geometrie der Prüfbacken zurückzuführen sein. Die ISO 16839 Prüfbacken mit der V-förmigen Nut bewirken womöglich, dass sich das Seil nicht so weit zusammendrücken lässt, wie dies der Fall wäre, wenn der Versuchsaufbau nach IMW Methode ohne Längskraft durchgeführt würde.

Als Ergebnis muss festgehalten werden, dass sich die beiden Versuche in wesentlichen Gesichtspunkten unterscheiden. Der erste Gesichtspunkt ist die Frage nach der Längskraft und der zweite Gesichtspunkt der nach der Situation, die nachgebildet werden soll. Aufgrund der Abbildung der Situation des Seils im Wickelpacket wird durch die ISO 16839 die Eigenschaft des Seiles bezüglich seiner Verformung in der Mehrlagenwicklung nachgebildet. Bei der Untersuchungsmethode

des IMW liegt der Focus auf der Auswirkung der Elastizitätseigenschaft des Seils auf die Belastung der Seiltrommel.

5 Zusammenfassung

Die Seileigenschaft der Verformung unter Querkraft kann nach ISO 16839 und nach der Methode am IMW durchgeführt werden. Dabei werden jedoch unterschiedliche Situationen des Seils nachgebildet. Daraus folgen verschiedene Werte für die Verformung. Nach der ISO 16839 erhält man eine prozentuale Verformung, während der Versuch nach der IMW Methode eine Elastizität in N/mm^2 ergibt.

Grundsätzlich besteht die Möglichkeit, die Versuche nach ISO 16839 auch nach der IMW Methode auszuwerten. Dies ergibt jedoch abweichende Werte, was auf die unterschiedlichen Testsituationen zurückzuführen ist. Somit lässt sich aus der ISO 16839 kein Wert ermitteln, der als Eingangswert für eine Trommeldimensionierung eingesetzt werden könnte, wie dies bei der zu diesem Zweck ermittelten Querelastizität nach der IMW Methode der Fall ist.

6 Literatur

- /1/ ISO Internationale Organisation für Normung: *Stahldrahtseile - Bestimmung der Anforderungseigenschaften von Stahldrahtseilen für seitliche Belastung*; 08.2013.
- /2/ Lohrengel, A.; Stahr, K. and Wächter, M.: *Safe use of hoisting drums wound with multiple layers of wire, hybrid, fibre and/or large diameter ropes*, Proceedings OIPEEC 2011 / 4th International Ropedays, College Station, Texas, 2011.
- /3/ Verreet, R.: *Spezialseile für mehrlagig bewickelte Seiltrommeln*, PR GmbH Werbe-agentur & Verlag, Aachen.
- /4/ Schulze, M.: *Die Bestimmung der Querelastizität von Draht- und Faserseilen – Die Methode am Institut für Maschinenwesen im Vergleich zum Normentwurf ISO 16839-2*, 19.11.2014