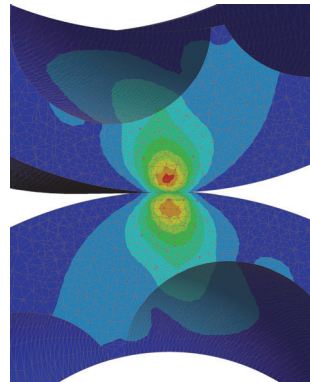


Simulation des Seil-Seil-Kontaktes im Kreuzungsbereich der Mehrlagenwicklung für kunststoffummantelte Drahtseile

Stök, M.; Schulze, M.; Lohrengel, A.

Im Forschungsvorhaben LifetimeCoatedRope sind die Schäden an kunststoffummantelten Drahtseilen in der Mehrlagenwicklung experimentell und numerisch untersucht worden. Insbesondere die Abschnitte des Seils in den Kreuzungsbereichen der Seiltrommel erfahren eine erhebliche Schädigung. Zur Ermittlung der zulässigen Querkraft im Kreuzungsbereich, ist ein Modellversuch durchgeführt und in Simulationen nachgebildet worden. Es wurde überprüft, ob es mit einem linearen Materialmodell möglich ist, das Materialverhalten der Kunststoffummantelung nachzubilden, da ein lineares Materialgesetz die Berechnungszeit erheblich verkürzt und weniger Informationen für das Materialmodell notwendig sind.



In the research project LifetimeCoatedRope, the damage to plastic-coated wire ropes in multilayer spooling has been analysed in experiments and numerical Simulations. In particular the rope in the crossover section of the drum are considerable damaged. To determine the permissible lateral force in the crossover section, a model test has been carried out and simulated. It was checked whether it is possible to simulate the material behaviour of the plastic coating with a linear material model, since a linear material law considerably shortens the calculation time and less information about the material are required.

Die Kunststoffe

Zur Ummantelung des konventionellen Drahtseiles wurden zwei verschiedene Polyethylene verwendet. Grundlegend unterscheiden sich die Werkstoffe in ihrer Dichteigenschaft - ein Werkstoff mit hoher und ein Werkstoff mit niedriger Dichte. Optisch waren die Seile auf Grund der Kunststofffarbe zu unterscheiden. Die Benennung „Seilvariante 1“ bezeichnet den durchsichtigen/transparenten Kunststoff, „Seilvariante 2“ den schwarzen Kunststoff.

Die Eigenschaften der Kunststoffe wurden am Institut für Polymerwerkstoffe und Kunststofftechnik (PUK) der TU Clausthal in Zugversuchen nach DIN EN ISO 527- 1 /1/ bestimmt. Weitere für die Simulation relevanten Materialkennwerte wurden in verschiedenen Literaturen recherchiert. Die aus dem uniaxialen Zugversuch ermittelten Werkstoffkennwerte sind in Tabelle 1 zusammengefasst. Die aufgenommenen Spannungs-Dehnungskurven sind in Abbildung 1 dargestellt.

Tabelle 1: Werkstoffkennwerte der beiden untersuchten Kunststoffe

	Kunststoff 1 PE niedriger Dichte	Kunststoff 2 PE hoher Dichte
Elastizitätsmodul Kunststoff	417 MPa	967 MPa
Zugfestigkeit	13,7 MPa	25,3 MPa
Bruchspannung	12,7 MPa	8,29 MPa
Dehnung bei Zugfestigkeit	300 %	10 %
Nominelle Bruchdehnung	-	18 %
Querdehnungszahl	0,48 /2/,/3/	0,38 /2/,/3/

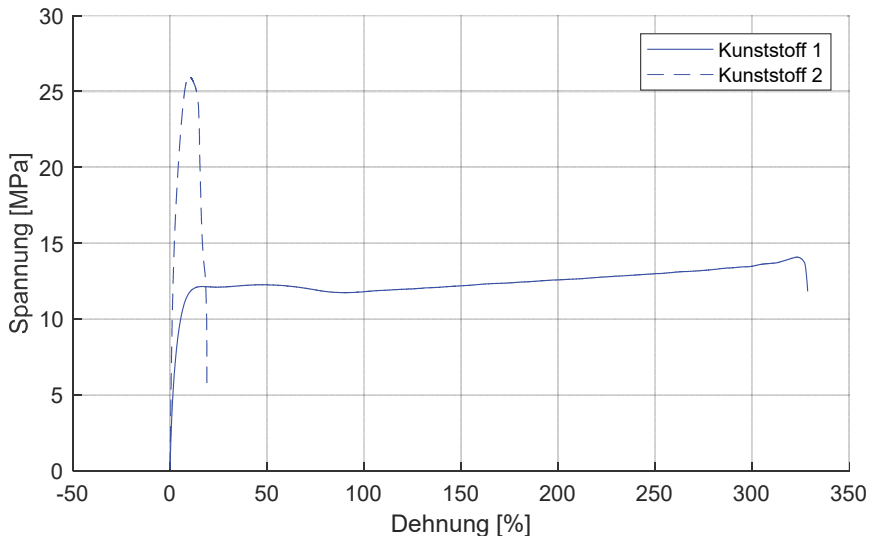


Abbildung 1: Experimentell ermittelte Spannungs-Dehnungskurven der Kunststoffe 1 und 2

Kunststoffe weisen drei Verformungsarten unter Belastung auf. Die elastische Verformung ist reversibel und beruht auf Abstandsänderungen von Atomen und Valenzwinkelverschiebungen. Dieser Anteil ist bei Kunststoffen sehr gering. Die zeitabhängige, reversible viskoelastische Verformung ist durch die Relaxationszeiten der Makromoleküle des Polymers gekennzeichnet. Der Werkstoff reagiert also zeitverzögert auf die äußeren Kräfte bis ein Gleichgewichtszustand erreicht ist. Mit zunehmender Belastung kommt es zu zeitabhängigen, irreversiblen, stark nicht linearen viskosen Verformungen /4/.

Viskoelastisches Materialverhalten hat sowohl die Eigenschaften einer viskosen Flüssigkeit als auch die eines elastischen Festkörpers. Daraus resultiert, dass es keinen direkten Zusammenhang zwischen der Spannung und der Dehnung gibt. Der viskose Anteil kann durch einen Dämpfer und der linear elastische Anteil durch eine Feder beschrieben werden. Das Maxwell-Modell ist die Reihenschaltung von Feder und Dämpfer und beschreibt den Relaxationsvorgang, also eine Abnahme der Spannung bei konstanter Dehnung. Eine bleibende Verformung des Kunststoffes bei Entlastung kann durch den Dämpferanteil in der Reihenschaltung realisiert werden. Die Parallelschaltung von Feder und Dämpfer ist das Kelvin-Voigt-Modell und beschreibt das Kriechverhalten, also die zunehmende Dehnung unter konstanter Last. Für eine hinreichend genaue Beschreibung von viskoelastischem Verhalten reichen die beiden einfachen, vorgestellten Modelle nicht aus. Für eine realistischere Beschreibung sind Kombinationen mehrerer Federn und Dämpfer nötig /5/.

Das viele der mechanischen Eigenschaften von Kunststoffen zeit- und temperaturabhängig sind, stellt Konstrukteure vor Herausforderungen. Insbesondere gilt dies für eine Auslegung im nichtlinearen Bereich, in denen Thermoplaste, wie die zur Ummantelung genutzten Kunststoffe, häufig beansprucht werden. Solange die Beanspruchung jedoch noch nahe dem linearen Bereich liegt, ist eine Auslegung mit den Gesetzen der Elastizitätstheorie vertretbar /4/.

Der Festigkeitskennwert ist bei einer ausgeprägten Streckgrenze oder einem sprödem Trennbruch leicht zu bestimmen. Bei allen anderen Kunststoffen wird analog zur Dehngrenze $R_{p0,2}$ für Kunststoffe ebenfalls eine Ersatzstreckgrenze bei einer Dehnung von 0,5 % definiert. Die 0,5 % Dehngrenze als zulässige Spannung liegt für Kunststoffvariante 1 bei 5,5 MPa und bei Kunststoffvariante 2 bei 13,5 MPa. Bei einer statischen Langzeitbelastung ist die Zeitstandfestigkeit σ^* als Festigkeitskennwert zu wählen /4/.

Für mehrachsige Spannungszustände ist mit einem geeigneten Versagenskriterium eine Vergleichsspannung zu berechnen. Die Vergleichsspannung kann dann im Festigkeitsnachweis mit der zulässigen Spannung verglichen werden. /6/ empfiehlt für Kunststoffe das Schubspannungskriterium nach Tresca

$$\sigma_v = 2 \cdot \tau \quad 1$$

und auch nach /4/ werden damit hinreichend genaue Ergebnisse erreicht. Da die Simulation von nichtlinearem Materialverhalten zu sehr langen Rechenzeiten führt und sehr arbeitsspeicherintensiv ist, soll untersucht werden, ob mit einem linearen Materialmodell die Beanspruchung bis zur bleibenden Verformung hinreichend gut beschrieben werden kann.

Der Versuch

Das Ziel des Experiments war die Identifizierung der Querkraft, ab welcher der Mantel geschädigt wird. Der kritische Bereich im Kontakt Seil/Seil liegt im Kreuzungsbereich vor. Während sich die Umwicklung einer oberen Lage im

Parallelbereich der Trommel auf die zwei unteren Umwicklungen abstützt, liegt im Kreuzungsbereich lediglich ein Kontakt vor, wie in Abbildung 2 zu sehen ist. Aus diesem Grund ist hier der Druck zwischen den Umwicklungen höher und damit ist hier eine frühere Schädigung des Mantels zu erwarten. Die Belastungssituation konnte mit einem Querprüfgerät nachgebildet werden. Dazu wurden zwei Seile mit einer definierten Querkraft in einem der Trommel entsprechendem Kreuzungswinkel α zusammengedrückt. Der prinzipielle Versuchsaufbau ist in Abbildung 3 dargestellt.

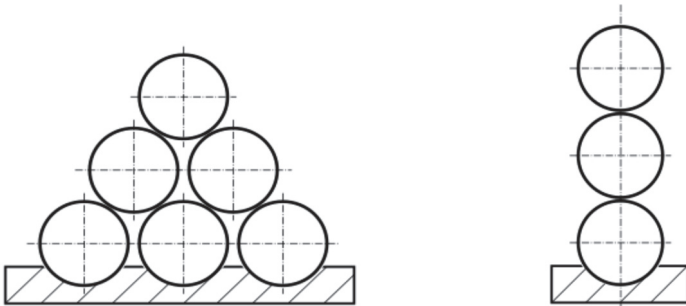


Abbildung 2: Die Kontaktsituationen im Parallelbereich (links) und im Kreuzungsbereich (rechts) der Seiltrommel /7/

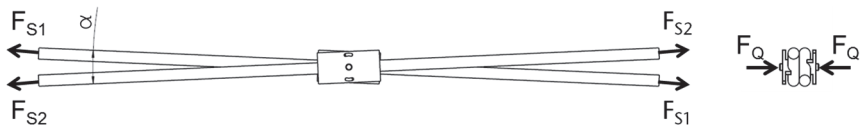


Abbildung 3: Prinzipieller Versuchsaufbau zur experimentellen Simulation der belasteten Seilkreuzung in der Mehrlagenwicklung

Zur möglichst realitätsnahen Nachbildung des Kontaktes konnten die Seile mit einer der Anwendung entsprechenden Seilkraft F_S belastet werden. Anschließend wurde der Kontakt in Querrichtung mit der dem Wickeldurchmesser und Seilzugkraft F_S entsprechenden Querkraft F_Q beaufschlagt. Die Seilkreuzung konnte im Bereich von 3° bis 7° variiert werden.

Da der Einfluss der Seilkraft auf die durch den Mantel ertragbare Querkraft als gering eingeschätzt wird, wurde das Experiment ohne die Aufbringung einer Seilzugkraft durchgeführt.

Als Ergebnis liegen unterschiedlich stark geschädigte Kunststoffmäntel vor (Abbildung 4). Für Seilvariante 1 war eine bleibende Beschädigung ab 12,5 kN Querkraft erkennbar. Bei Seilvariante 2 waren Eindrücke des gegenüberliegenden Seils bereits ab 7,5 kN Querkraft vorhanden. Bei beiden Ummantelungen zeigte sich ab 30 kN Querkraft eine erhebliche Beschädigung des Mantels. Ab 40 kN Querkraft waren einzelne Drähte durch den Mantel zu sehen.

Um den relevanten Kraftbereich zu bestimmen, wurde die Kontaktlänge nach den Versuchen ermittelt. Sobald bleibende Eindrücke nach dem Aufbringen der Querkraft erkennbar waren, konnte die Kontaktlänge gemessen werden. Unabhängig von der dabei aufbrachten Kraft ergab sich eine Kontaktlänge von 90 mm. Dies ist durch den maximal möglichen Kontakt im Kreuzungsbereich begründet.

Durch die weiteren Faktoren Querspannungsverhältnis k_Q und Seilkraft F_S wurde die Belastungssituation festgelegt. Allgemein berechnet sich die Querkraft nach

$$F_Q = k_Q \cdot F_S \cdot \frac{l_{max}}{\sqrt{A_{Met}}} \quad 2$$

Mit l_{max} als Kontaktlänge und dem metallischen Querschnitt des Seils A_{Met} .

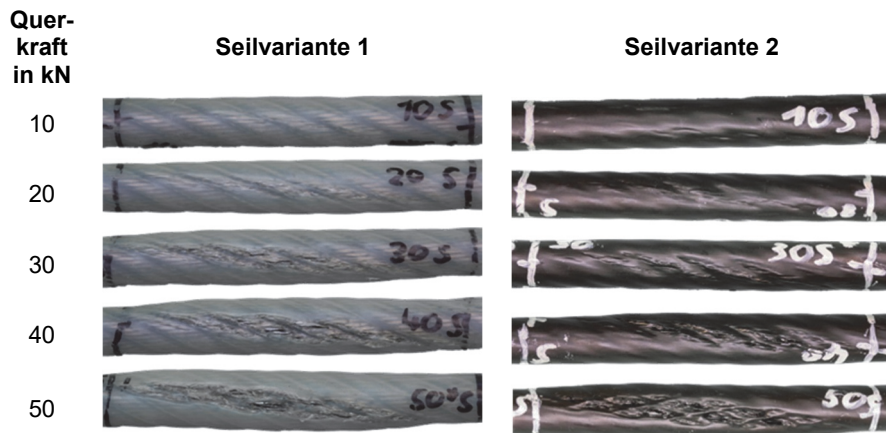


Abbildung 4: Beschädigungen in Folge des durch die Querkraft belasteten Seil/Seil-Kontakts

Für Trommel 1 mit einem D/d-Verhältnis von 24 ergab sich bei einer Seilkraft von 20 % der Mindestbruchkraft eine Querkraft von

$$F_{Q,D/d=24} = 14,3 \text{ kN}. \quad 3$$

Auf der Trommel 2 betrug die Querkraft entsprechend des kleineren Trommeldurchmessers bei einem D/d-Verhältnis von 18 und bei gleicher Seilkraft

$$F_{Q,D/d=18} = 19,1 \text{ kN}. \quad 4$$

Die im Modellversuch ermittelten Schädigungen decken sich mit den in Spulversuchen gemachten Beobachtungen, bei denen der Kunststoffmantel bereits nach der ersten Belastung bleibende Deformationen aufwies.

Die Simulation

Die Geometrie des Seils wurde vereinfacht, indem die Litzen des Seils als Zylinder modelliert wurden. Die Kontaktanzahl der vielen Einzeldrähte in den Litzen konnte so vermindert werden und auch Anzahl der Elemente wurde reduziert. Die Kontakte innerhalb des Seils sowie zwischen Seil und Mantel wurden als „bonded“ eingestellt. Damit ist keine Verschiebung der Kontaktpartner zueinander möglich. Die Belastung stellte sich aufgrund einer definierten Verschiebung des oberen Seils ein. Die resultierende Kraft wurde über „Force Reaction“ ausgewertet. Das Modell ist in Abbildung 5 dargestellt.

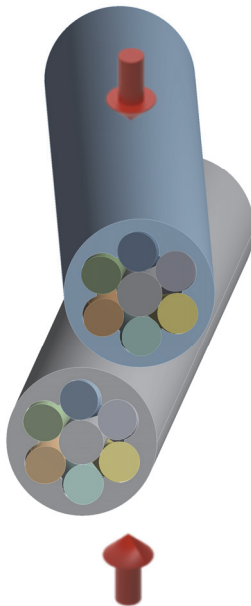


Abbildung 5: Vereinfachtes Modell zur Simulation „Querkraft auf Seilkreuzung“

Ausgewertet wird die Simulation für ein D/d -Verhältnis von 24 und einer Seilzuglast von 20% der Mindestbruchlast (MBL). Für Kunststoffvariante 1 sind bei dieser Last im Experiment bleibende Verformungen beobachtet worden. Bei Kunststoff 2 sind die bleibenden Verformungen bereits bei der Hälfte der Last beobachtet worden. Die simulierten Spannungen sollten bei Kunststoff 1 also um die Zugfestigkeit R_m und bei Kunststoff 2 weit darüber liegen.

In Abbildung 6 sind die Scherspannungsverläufe für die beiden simulierten Kunststoffe dargestellt. Die auftretenden Scherspannungen wurden mit der Schubspannungshypothese nach Tresca in eine Vergleichsspannung umgerechnet und sind auf die jeweilige Zugfestigkeit normiert worden. Alle Spannungen die

darüber liegen sind grau dargestellt. Bei Kunststoff 2 lag die berechnete maximale Schubspannung 187,7 % über der Zugfestigkeit, was zu erwarten war, da die bleibenden Deformationen bereits bei sehr viel geringeren Lasten auftraten. Bei Kunststoff 1 waren die simulierten Spannungen 292,7 % über der Zugfestigkeit, obwohl R_m im Experiment nur knapp überschritten wurde.

Bei einer so großen Abweichung zwischen der berechneten Spannung und der in Versuchen auftretenden Schädigung der Seile, ist ein lineares Materialmodell nicht geeignet, die Beschädigung der Kunststoffummantelung vorherzusagen. In zukünftigen Untersuchungen muss auf viskoelastische Materialmodelle zurückgegriffen werden.

Tabelle 2: Maximale Schubspannungen und Festigkeiten bei linearem Materialmodell in der Simulation

	Kunststoff 1	Kunststoff 2
Max. Schubspannung FEM [MPa]	26,901	36,349
zul. Schubspannungen (Tresca) [MPa]	6,85	12,635
Überschreitung R_m [%]	292,7	187,7

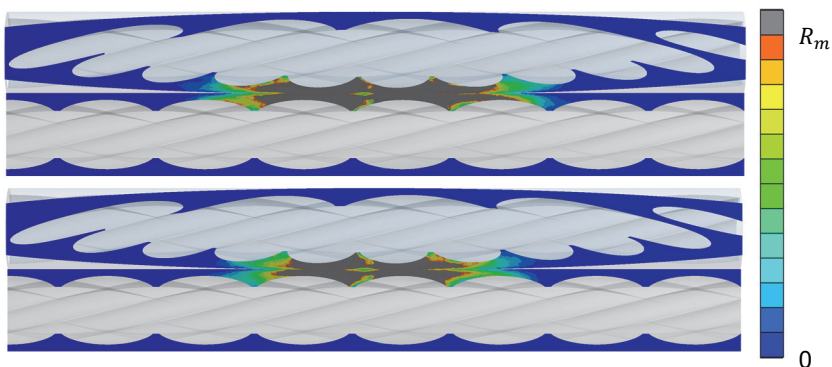


Abbildung 6: Maximale Scherspannung für Kunststoff 1 (oben) und Kunststoff 2 (unten) normiert auf die Zugfestigkeit

Zusammenfassung

Kunststoffe weisen ein viskoelastisches Materialverhalten auf. Solange die Last jedoch nahe des elastischen Bereichs liegt ist nach /4/ eine Auslegung nach der Elastizitätstheorie vertretbar. Simulationen mit einem linearen Materialverhalten sind im Gegensatz zu nichtlinearen Materialmodellen erheblich schneller und schonen Rechenkapazitäten. Deshalb wurde untersucht, ob die Berechnung des Seil-Seil-Kontaktes im Kreuzungsbereich einer Seiltrommel mit einem linearen Materialmodell bis zum Auftreten erster bleibender Verformungen am Kunststoffmantel möglich ist. Zwischen dem experimentellen Versuch und der

Simulation sind die Abweichungen zwischen den Ergebnissen jedoch so groß, dass bei zukünftigen Untersuchungen viskoelastische Materialmodelle verwendet werden.

Literatur

- /1/ DIN EN ISO 527-1: Kunststoffe - Bestimmung der Zugeigenschaften - Teil 1: Allgemeine Grundsätze (ISO 527-1:2019); Deutsche Fassung EN ISO 527-1:2019
- /2/ Ehrenstein, G. W.: Mit Kunststoffen Konstruieren, 2. Auflage, Hanser Verlag, München Wien, 2002
- /3/ Oberbach, K.: Kunststoff-Kennwerte für Konstrukteure, 2. überarbeitete und erweiterte Auflage, Carl Hanser Verlag, München, Wien, 1980
- /4/ Erhard, G.: Konstruieren mit Kunststoffen. München: Hanser, 2008
- /5/ Gross, D.; Hauger, W.; Wriggers, P.: Technische Mechanik 4: Hydromechanik, Elemente der Höheren Mechanik, Numerische Methoden. Berlin Heidelberg New York: Springer-Verlag, 2011
- /6/ Dipl.-Ing. Gebhardt C.: Praxisbuch FEM mit ANSYS Workbench, Carl Hanser Verlag, München, 2011
- /7/ Mann, L.; Dreblow, J.: Untersuchung der Auswirkung von Kunststoffummantelungen auf die Querelastizität von Drahtseilen, nicht veröffentlichte Projektarbeit TU Clausthal 2018