

## Tradition und Zukunft – Aktivitäten in der Seilforschung am Institut für Maschinenwesen

Leng, M.; Stahr, K.; Wächter, M.

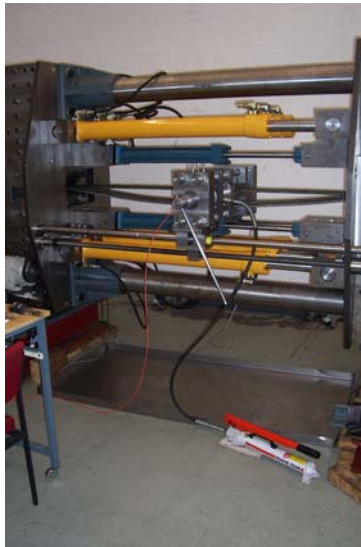


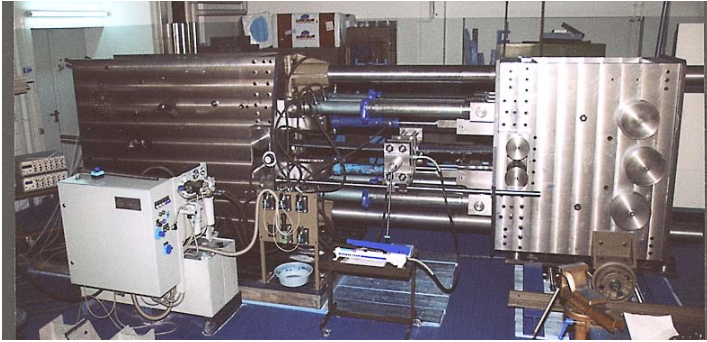
*Das Institut für Maschinenwesen zeichnete sich in der Vergangenheit durch Forschungsaktivitäten zum Beanspruchungs- und Verformungsverhalten von Seiltrommeln aus. Aufbauend auf diesen Erfahrungen werden verschiedenste Untersuchungen aus dem Bereich der Seil- und Seiltrommelforschung fortgeführt. Dieser Artikel gibt darüber einen Überblick.*

*The Institute of Mechanical Engineering was characterised by research activities about stress and deformation behaviour of rope drums. Bottom-up this knowledge, several examinations from the range of rope and rope drum research are to be continued. This article gives an overview.*

### 1 Verhalten von Kunststoffseilen

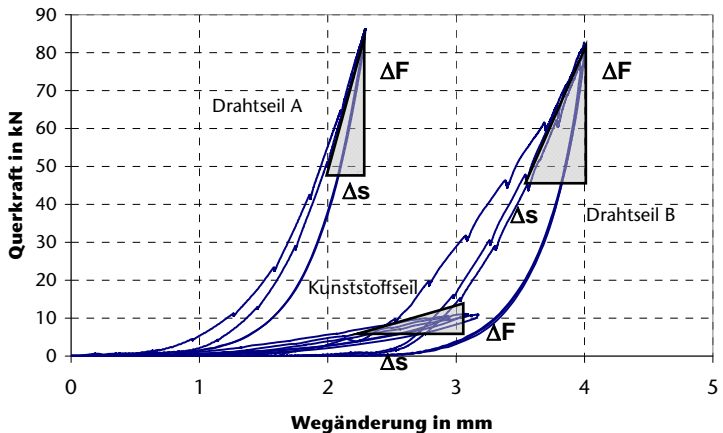
Das Institut für Maschinenwesen beschäftigt sich schon seit vielen Jahren mit der Thematik der Seileigenschaften und den daraus resultierenden Einflüssen auf die Trommelkonstruktion bei einer Bewicklung mit Drahtseilen. In letzter Zeit kommen verstärkt Kunststoffseile aus aromatischem Polyamid oder Polyethylen in Hybrid- oder reiner Kunststoffbauart auf den Markt und auch zum Einsatz bei mehrlagiger Bewicklung von Seiltrommeln. Die Einflussnahme auf das Trommelverhalten infolge der andersartigen Seileigenschaften ist aber noch weitestgehend unbekannt.



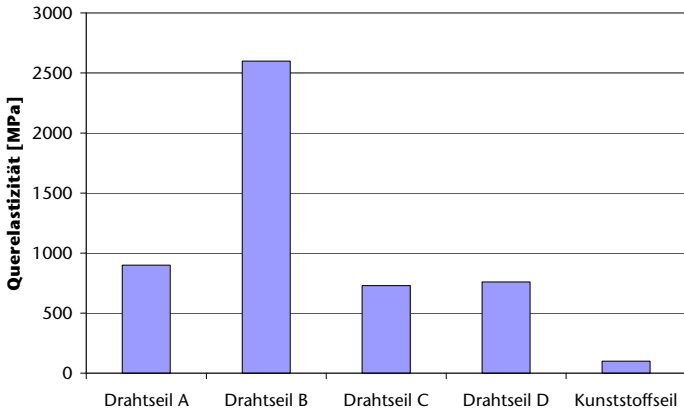


**Bild 1:** Seilprüfstand

Am Institut für Maschinenwesen wurden am institutseigenen Seilprüfstand (**Bild 1**) Untersuchungen zur Querelastizität an einem Kern-Mantelgeflecht-Seil aus DYNEEMA SK75 (Nenndurchmesser 14mm, 32-fach geflochtener Mantel) durchgeführt /1/. **Bild 2** zeigt das Kraft-Weg-Verhalten des Kunststoffseils im Vergleich zu zwei Drahtseilen. Die Ergebnisse sind jeweils für eine Säulenordnung von 4 Seilen, unter einer Vorspannung in Längsrichtung von 20% der Mindestbruchkraft dargestellt. Erwartungsgemäß zeigt sich ein erheblich flacherer Verlauf für das DYNEEMA-Seil. Die Steigung des Kraft- Weg-Verlaufs ist ein Maß für die Quersteifigkeit der Seile.

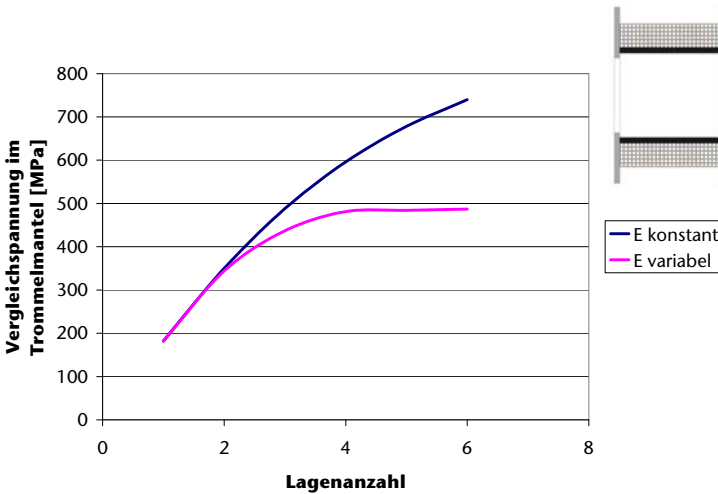


**Bild 2:** Vergleichende Kraft-Weg-Diagramme



**Bild 3:** Querelastizitätsmodul Draht- und Kunststoffseil

Bild 3 gibt einen Überblick über den Querelastizitätsmodul von vier Drahtseilen unterschiedlichen Aufbaus und des Kunststoffseils bei einem Seildurchmesser von 14 mm. Die Quersteifigkeit des Kunststoffseils macht nur einen Bruchteil der Quersteifigkeit der unterschiedlichen Drahtseile aus.

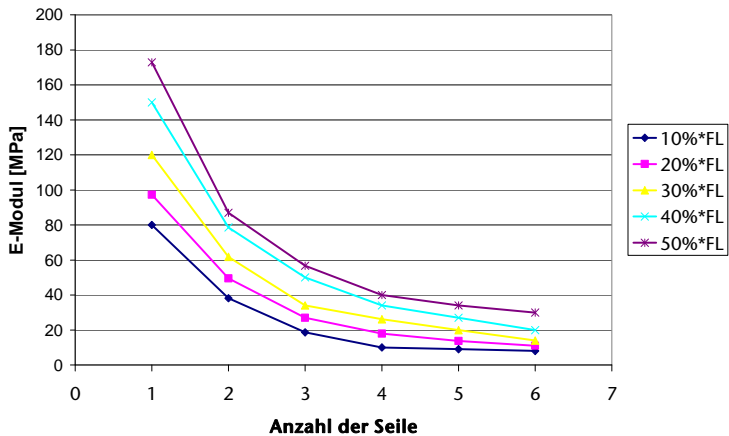


**Bild 4:** Beanspruchung des Trommelmantels bei mehrlagiger Bewicklung mit Kunststoffseil

Die Beanspruchung des Trommelmantels und der Bordscheiben einer Seiltrommel ist bekannter weise stark abhängig von den Seilelastizitäten in Längs- und Querrichtung. Beim Einsatz eines Kunststoffseils muss somit von stark variierenden Beanspruchungen in der Seiltrommel ausgegangen werden und eine Optimierung der Trommelkonstruktion für den geänderten Einsatzfall wird empfohlen.

Für eine Trommel wird die Vergleichsspannung im Trommelmantel bei mehrlagiger Bewicklung simuliert. Bei der Annahme, dass sich die Quersteifigkeit eines Seilpakets unabhängig von der Lagenanzahl verhält, lässt sich eine Steigerung der Beanspruchung mit der Lagenzahl feststellen. Bei Berücksichtigung des realen Effektes, dass sich die Quersteifigkeit eines Seilpakets in Abhängigkeit von der Lagenanzahl verändert, lässt sich ab 4 Lagen eine Annäherung an einen Beanspruchungsgrenzwert feststellen (**Bild 4**)

Das Verhalten des Querelastizitätsmoduls des DYNEEMA–Seils ist in Abhängigkeit von der Anzahl der Lagen in **Bild 5** dargestellt. Die Quersteifigkeit sinkt mit zunehmender Lagenzahl und steigt mit ansteigender Längs- als auch Querkraft.



**Bild 5:** Querelastizitätsmodul in Abhängigkeit von der Lagenanzahl und der Längskraft für DYNEEMA SK 75 Seil mit 14 mm Durchmesser

Ergänzend zu den vorhergehenden Steifigkeitsuntersuchungen wurde das Spulverhalten eines Seiles aus Dyneema SK75 auf dem institutseigenem Windenprüfstand (**Bild 6**) untersucht. Primär dient dieser Prüfstand der Verifizierung des Beanspruchungsverhaltens von Seiltrommeln im Betrieb. Das Steuerprogramm des Prüfstands ermöglicht die Simulation verschiedener Betriebssituationen, wie beispiels-

weise das Aufwickeln des Seiles mit konstanten Betriebsparametern (Zugkraft, Seilgeschwindigkeit) oder mit variablen Parametern in Abhängigkeit der jeweiligen Seillage. Ebenfalls sind automatisierte Dauerversuche mit Vorprogrammierung der Betriebsparameter möglich.

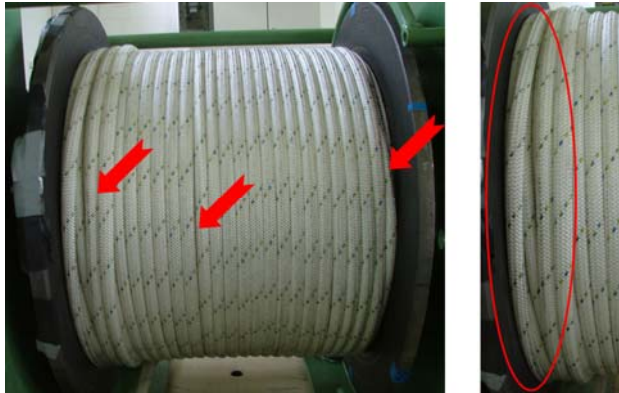


**Bild 6:** Seiltrommelprüfstand mit Telemetrie

Das im Vorfeld betrachtete Kunststoffseil aus Dyneema SK75 wurde im Zuge eines Spulversuches mit einer Seilzugkraft von 20% der Mindestbruchkraft bei einer Seilgeschwindigkeit von 20 m/min in 5 Lagen auf eine gegessene Trommel gewickelt. Der Spulvorgang wurde mittels einer Hochgeschwindigkeitskamera dokumentiert /1/.

Ab der zweiten Seillage konnte hierbei ein unregelmäßiges Spulbild aufgrund einer starken Abplattung des Seiles durch ansteigenden Querdruck beobachtet werden. Ein stabiles Seilpaket stellte sich durch die starke Verformung des Seiles nicht ein. Die Unregelmäßigkeiten kumulierten sich im weiteren Spulungsprozess auf, was bis hin zum Überspringen einzelner Windungen führte. Es bildeten sich unregelmäßige Lücken, was ab der dritten Seillage insbesondere in den Aufstiegsbereichen zu vergrößerten Zwischenräumen führte, in die das Seil abglitt (vgl. **Bild 7**). Die Untersuchungen werden für Kunststoffseile verschiedener Flechtarten und Materialien weitergeführt.

Zusammenfassend ist fest zu halten, dass bezüglich der Gestaltung und Dimensionierung von Seiltrommeln bei mehrlagiger Bewicklung mit Kunststoffseilen derzeit wenig bis keinerlei gesicherte Erkenntnisse zu Verfügung stehen. Es besteht somit großer Forschungsbedarf bezüglich der die Trommelbeanspruchung beeinflussenden Seileigenschaften, insbesondere der sich einstellenden Seilpaketsteifigkeit und des resultierenden Spulverhaltens.



**Bild 7:** Unregelmäßiges Spulbild eines Seiles aus DYNEEMA SK 75 Ø 14mm

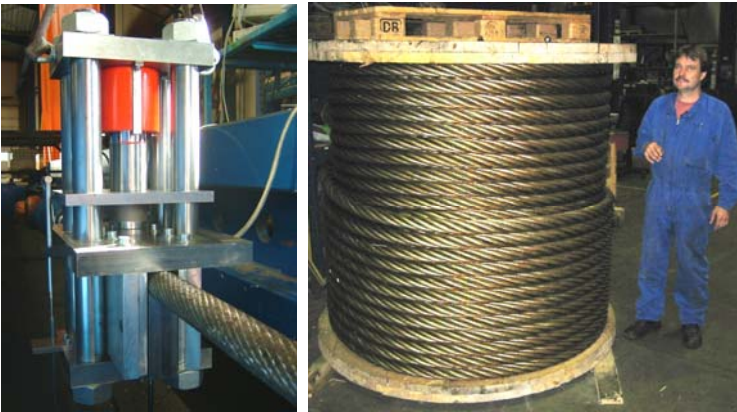
## 2 Ermittlung des Querelastizitätsmoduls

Der bestehende stationäre Seilprüfstand am Institut für Maschinenwesen (**Bild 1**) erlaubt Untersuchungen an Seilen mit einem Seildurchmesser von 7 mm bis 32 mm. Die Zugkraft in Längsrichtung ist auf maximal 1200 kN und die Prüfkraft in Querrichtung auf maximal 500 kN begrenzt.

Im Offshore-Bereich kommen jedoch vermehrt Seile mit Durchmesser von 80 mm und mehr zum Einsatz. Die Seilhersteller machen sich bei höheren Nenndurchmessern die Vorteile modifizierter Seilkonstruktionen zu Nutze, eine simple Größenskalierung des Seilaufbaus findet hierbei ausdrücklich nicht statt. Der Einfluss eines charakteristischen Seilparameters - dem Querelastizitätsmodul  $E_{SQ}$  - auf den Beanspruchungszustand der Seiltrommel wies Dietz /2/ bereits vor nunmehr fast 40 Jahren nach (vgl. ebenso /3/). Aussagen zu diesem Elastizitätsverhalten bei Seilen derartiger Größenordnung liegen jedoch nur sehr selten vor. Die sich konstruktionsbedingt einstellenden Seileigenschaften bedingen einen erhöhten Untersuchungsbedarf, insbesondere bezüglich der Bestimmung der Seilelastizität. Schadensfälle an Trommeln zeigen zudem, dass derzeit gültige Berechnungsvorschriften nur eine ungenügende Auslegungshilfe für diese Seiltypen darstellen.

Um dem vermehrten Einsatz und Untersuchungsbedarf bei Seildurchmessern  $>32$  mm Rechnung zu tragen, wurde am Institut für Maschinenwesen ein mobiles Querprüfgerät zur Bestimmung des charakteristischen Querelastizitätsmoduls  $E_{SQ}$  unter variabler Längsspannung entwickelt. Die lastabhängige Kenngröße kann nunmehr

im konkreten Anwendungsfall (Krane, Schiffe etc.) geprüft und bestimmt werden (**Bild 8**).



**Bild 8:** Mobiles Querprüfgerät für große Seildurchmesser im Einsatz

Die zur Querelastizitätsmessung erforderlichen variablen Seilzugkräfte werden hierbei nicht mehr wie bisher „künstlich“ mittels einer Hydraulik am stationären Prüfgerät /4/ aufgebracht, vielmehr erfolgt eine Einstellung reeller Einsatzbedingungen vor Ort durch die eigentliche Last selbst. Zur Messung des charakteristischen Kennwertes  $E_{SQ}$  ist zu bemerken, dass nicht die Durchmesserverringering des Seiles unter Längsvorspannung relevant ist. Vielmehr ist das Elastizitätsverhalten unter einer zusätzlich wirkenden Querkraft die Zielgröße.

**Bild 8** zeigt die Messeinrichtung im Einsatz: die Anordnung besteht im Wesentlichen aus einem Hochdruckhydraulikzylinder, welcher über variable Stempelgeometrien eine Prüfkraft in die im Prüfstand befindliche Drahtseilanordnung einleitet. Als Messgrößen werden die in Seilquerrichtung aufbrachten Kräfte sowie ein Messweg unter der eingestellten Last erfasst (vergl. Kapitel 1).

Als Ergänzung zu dem seit nun mehr als 10 Jahren am Institut vorhandenen stationären Prüfaufbau können mittels des mobilen Querprüfgerätes gegenwärtig Drahtseile in einem Durchmesserbereich von 32 bis 100 mm unterschiedlichster Machart in bis zu 3 Lagen geprüft werden.

Die so ermittelten Kennwerte dienen unter Verwendung einer geeigneten Dimensionierungsmethode der sicheren Auslegung von Trommelkörpern. Das Ziel der Generierung eines geeigneten und vor

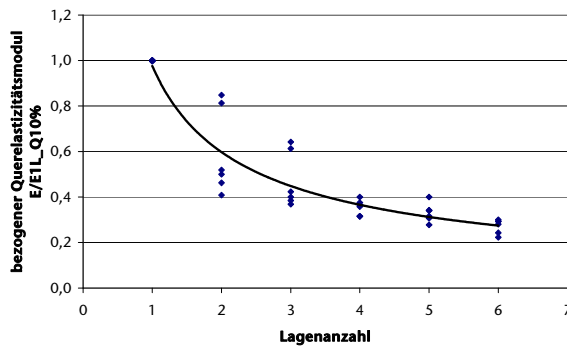
allem standardisierten Messverfahren zur Ermittlung der Querelastizitätsmoduln von Drahtseilen wird somit weiterhin voran getrieben.

Weiterhin legt die Auswertung der entstehenden Querelastizitätsmessungen an Seilen unterschiedlicher Durchmesser die Annahme nahe, dass in Abhängigkeit vom einlagig bestimmten Querelastizitätsmodul eine Aussage zum Quermodul von Seilen bei mehrlagiger Bewicklung möglich ist. In **Bild 9** ist für sechs Seile unterschiedlichem Aufbaus und Seildurchmessers eine Normierung der Querelastizitätsmodule auf den Referenzwert bei einlagiger Bewicklung erfolgt.

Die Ausgleichfunktion erlaubt anhand des einlagig bestimmten Querelastizitätsmoduls eine Aussage zum Verhalten bei mehrlagiger Bewicklung. Mit Hilfe des mobilen Querprüfgeräts lassen sich sowohl Quersteifigkeiten als auch Längssteifigkeiten für Seile mit einem Durchmesser bis 100 mm bestimmen. Mit diesem Verfahren wäre ein wichtiger Schritt in Richtung einer realitätsnahen Auslegung von Seiltrommeln in diesem Seildurchmesserbereich möglich.

Darüber hinaus sich Aussagen zur Quersteifigkeit bei einer geänderten Prüfkraft in Querrichtung mit Hilfe von Ausgleichsfunktionen möglich.

Zur Qualitätsverbesserung der Ausgleichsfunktionen werden gegenwärtig weitere Quersteifigkeitswerte von Seilen ausgewertet. In naher Zukunft sollte eine abgesicherte Datenbasis für Seile bis 32 mm Seildurchmesser vorliegen. Zu Klären bleibt die Frage, ob diese Ausgleichsfunktionen uneingeschränkt für Seile im Durchmesserbereich über 40 mm gültig sein, hier sind weitere Forschungsaktivitäten unabdingbar.

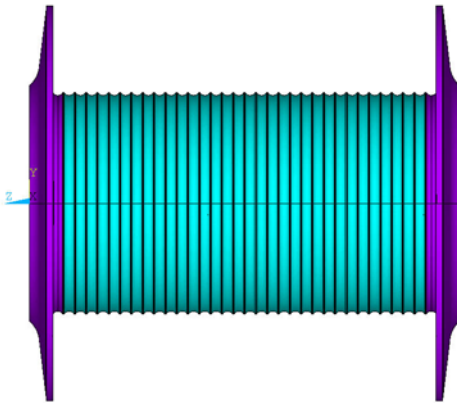


**Bild 9:** Normierte Querelastizitätsmodule in Abhängigkeit von der Lagenanzahl bei einer Längskraft von 10 % der Mindestbruchkraft für 6 Seile mit unterschiedlichen Durchmessern

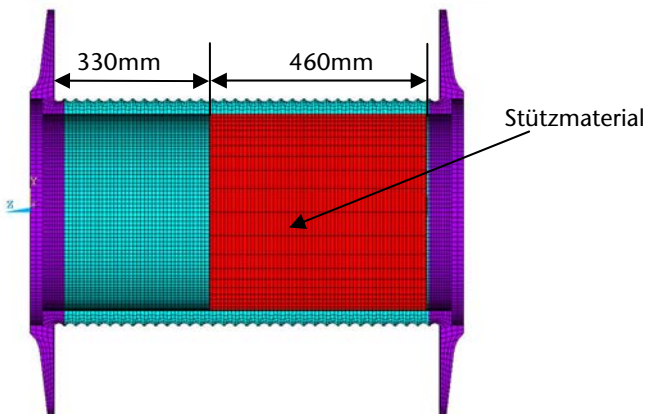


### 3 Einflussnahme auf die Seiltrommelbelastbarkeit

Mit Hilfe der Finite-Elemente-Methode ist eine Messtrommel unter verschiedenem Belastungen analysiert werden. Bei der Modellierung in ANSYS wurde die Geometrie der Trommel im Bereich der Lebus-Rillung leicht variiert, um die Generierung unregelmäßiger Elemente zu vermeiden, die zu verfälschten Rechenergebnissen führen. Die simulierte Messtrommel ist in **Bild 10** dargestellt. Dort ist zu erkennen, dass die Lebus-Rillung nicht spiralförmig verläuft. Sie besteht aus parallelen kreisförmigen Segmenten.

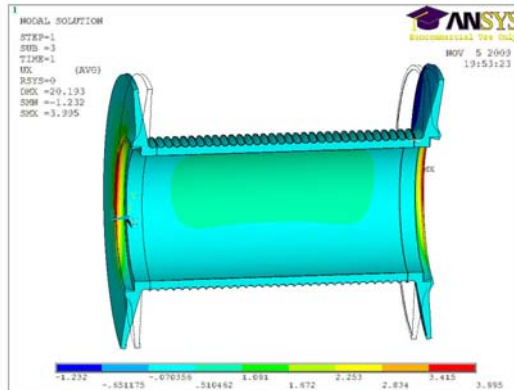


**Bild 10:** Simulierte Geometrie der Messtrommel

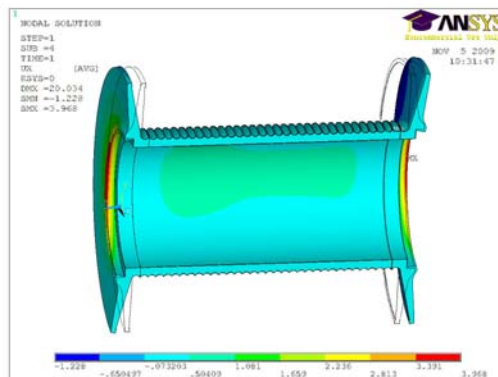


**Bild 11:** Simulierte Geometrie der Messtrommel mit Stützmaterial

Im Folgenden werden die Ergebnisse von zwei Berechnungen der Messtrommel miteinander verglichen. In beiden Berechnungen sind die Randbedingungen, die Belastungen und die Eigenschaften der Materialien identisch. Sie unterscheiden sich dadurch, dass einmal eine unverstärkte und einmal eine durch Stützmaterial verstärkte Trommel verwendet wurden. In **Bild 11** ist eine geschnittene Messtrommel mit Stützmaterial dargestellt, zwischen Trommelmantel und Stützmaterial ist ein Luftspalt realisiert.



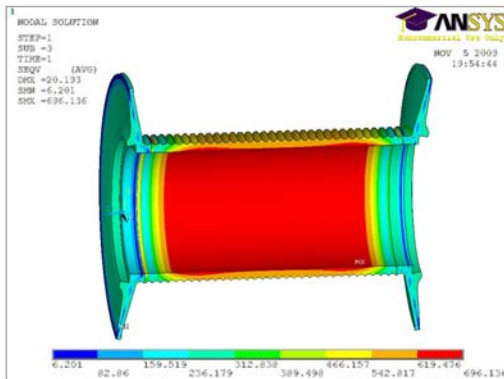
**Bild 12:** Radialverformung der Messtrommel mit 7 Lagen, ohne Stützmaterial



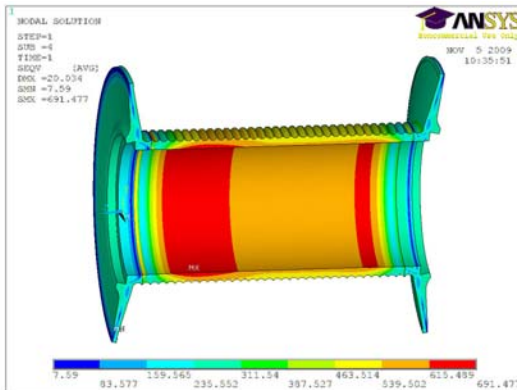
**Bild 13:** Radialverformung der Messtrommel mit 7 Lagen, mit Stützmaterial

**Bild 12** und **13** zeigen die radialen Verformungen der simulierten Geometrie. Es fällt auf, dass sich die radialen Verformungen im gefüllten Bereich reduzieren und es somit zu einer Stützwirkung kommt.

Mittels des Stützmaterials wird eine Reduktion der Vergleichsspannung im Trommelmantel um 20% realisiert (**Bild 14** und **Bild 15**). Diese analytischen Untersuchungen sind durch experimentelle Untersuchungen zu validieren.



**Bild 14:** Vergleichungsspannung der Messtrommel mit 7 Lagen



**Bild 15:** Vergleichungsspannung der Messtrommel mit 7 Lagen, mit Stützmaterial

## 4 Zusammenfassung

Drahtseile sind aus dem heutigen Alltag nicht mehr wegzudenken. Diesen Erfolg hätte sich Oberbergrat Albert im Jahr 1834 wohl kaum träumen lassen, richtete sich sein berechtigter Stolz doch „nur“ auf die Lösung eines brennenden, schon Existenz bedrohenden Problems im Bergbau. Am 22. Juli 1834 meldeten die Verantwortlichen der Grube Caroline stolz den erfolgreichen Betrieb eines erstmalig in ganzer Schachtlänge eingehängten Drahtseiles. 2009 jährt sich die Erfindung des Drahtseiles zum 175. Mal, was im Rahmen eines Kolloquiums und Drahtseilfestes in Clausthal feierlich begangen wurde. Diese Ereignisse erinnerten an die größte Erfindung, die Menschen des Harzer Bergbaus je hervorgebracht haben.

Die Einblicke in die Forschungsaktivitäten des Instituts für Maschinenwesen zeigen, dass die Problemstellungen um die Maschinenelemente Seil und Seiltrommel auch nach 175 Jahren noch nicht abschließend gelöst sind. Durch den Einsatz neuer Materialien und gesteigerter Einsatzbedingungen ist eine Fortführung der Forschung auf diesem Gebiet zwingend erforderlich.

## 5 Literatur

- /1/ Lohrengel, A.; Stahr, K.; Wächter, M.: Einflüsse der Seileigenschaften von Kunststoffen auf die Trommel. Fachvortrag im Rahmen des 3. Fachkolloquiums der Fachgruppe InnoZug, TU Chemnitz, 2009
- /2/ Dietz, P.: Ein Verfahren zur Berechnung ein- und mehrlagig bewickelter Seiltrommeln. Dissertation, TH Darmstadt, 1971
- /3/ Henschel, J.: Institutsmitteilung Nr. 20, Institut für Maschinenwesen der TU Clausthal, 1995
- /4/ Henschel, J.; Mupende, I.: Institutsmitteilung Nr. 22, Institut für Maschinenwesen der TU Clausthal, 1997