

Der Einfluss des Rillungssystems auf die Bordscheibenbelastung

Mupende, I.; Otto, St.

Der Einfluss des Rillungssystems auf die Beanspruchungen der Bordscheiben und des Mantels einer Seiltrommel war in der Vergangenheit kaum Gegenstand wissenschaftlicher Untersuchungen. Im Rahmen verschiedener Forschungsprojekte zur Konstruktion und Dimensionierung von Leichtbau-Seiltrieben wurden am Institut für Maschinenwesen der TU Clausthal theoretische und experimentelle Arbeiten zu diesem Thema durchgeführt. Für die experimentellen Versuche kam ein deutschlandweit einzigartiger Windenprüfstand zum Einsatz, über den im folgenden u.a. berichtet wird.

So far, the influence of the hoisting drum winding system on the loads of the drum cylinder and end plates was not investigated in detail. Within several research projects in the field of design and calculation of hoisting drums, the Institute of Mechanical Engineering has undertaken theoretical and numerical investigations regarding the above mentioned problem. The experimental tests were done with an unique drum-winch test rig that is described amongst other things in this article.

1 Einleitung

Die ursprünglich in der Förder- und Hebeteknik eingesetzten Seiltrommeln besaßen einen glatten Trommelmantel. Damit war die Restriktion verbunden (nach §21 der Unfallverhütungsvorschrift [1]), dass das Seil in erster Linie nur einlagig aufgewickelt werden durfte, weil die Seilführung schlecht und die Gefahr des Einschneidens höherer Lagen sowie des Aufbaus des Seils an einer Stelle groß war (**Bild 1**). Eine mehrlagig bewickelte glatte Trommel wurde deshalb ausschließlich in Verbindung mit geringen Ansprüchen an die Zugkraft (z.B. Speichertrommel hinter einem Treibscheibenantrieb) eingesetzt. Später versah man den Mantel häufig mit schraubenförmig eingedrehten Rillen (**Bild 2**), womit die Seilführung in der ersten Lage – und nur in dieser – verbessert werden konnte. Eine Mehrlagenbewicklung unter hohen Zugkräften war aber auch mit diesem Wickelsystem nicht realisierbar. Zudem führte der lange Kreuzungsbereich der einzelnen Windungen zu einem ausgedehnten Seilverschleiß und damit zu einer geringen Lebensdauer des Seils.

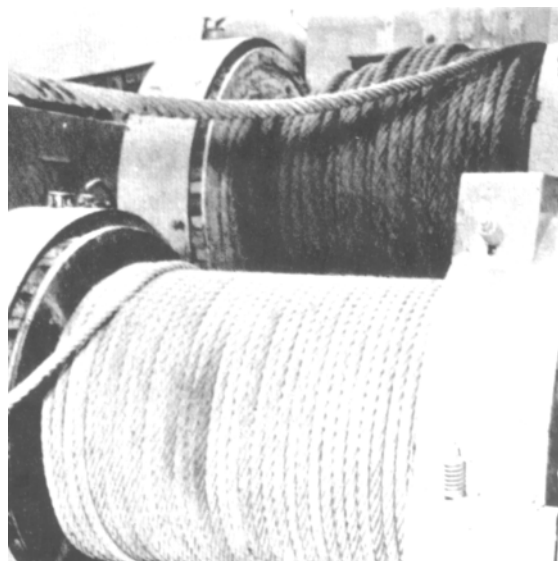


Bild 1: Vergleich der Wickelbilder; glatte Seiltrommel mit aufgebautem Seil (oben im Bild) und geordnetes Seilpaket bei einer Trommel mit Rillungssystem nach LeBus (unten im Bild), [2]

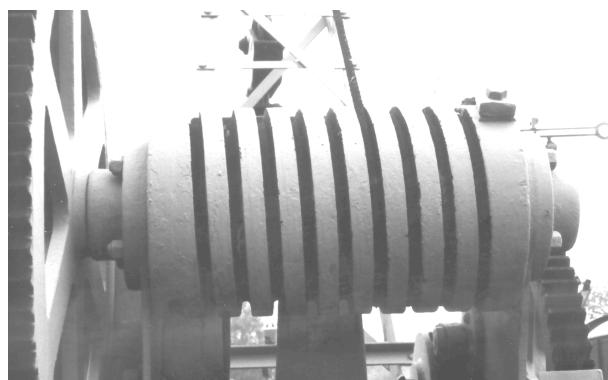


Bild 2: Beispiel für eine einlagige Seiltrommel mit schraubenförmiger Rillung (Mobilkran der 20er Jahre)

2 Rillungssystem nach LeBus

Anfang der 60er Jahre stellte die Firma LeBus International Engineers ein neues Rillungssystem vor, das heute im Bereich der Hub- und Bergwinden eine breite Anwendung findet. Dieses, im allgemeinen als Lebusberillung bezeichnete, Rillungssystem ist durch vier Umfangsbereiche – zwei Parallelabschnitte und zwei Steigungsabschnitte, in denen das Seil jeweils um den halben Windungs-

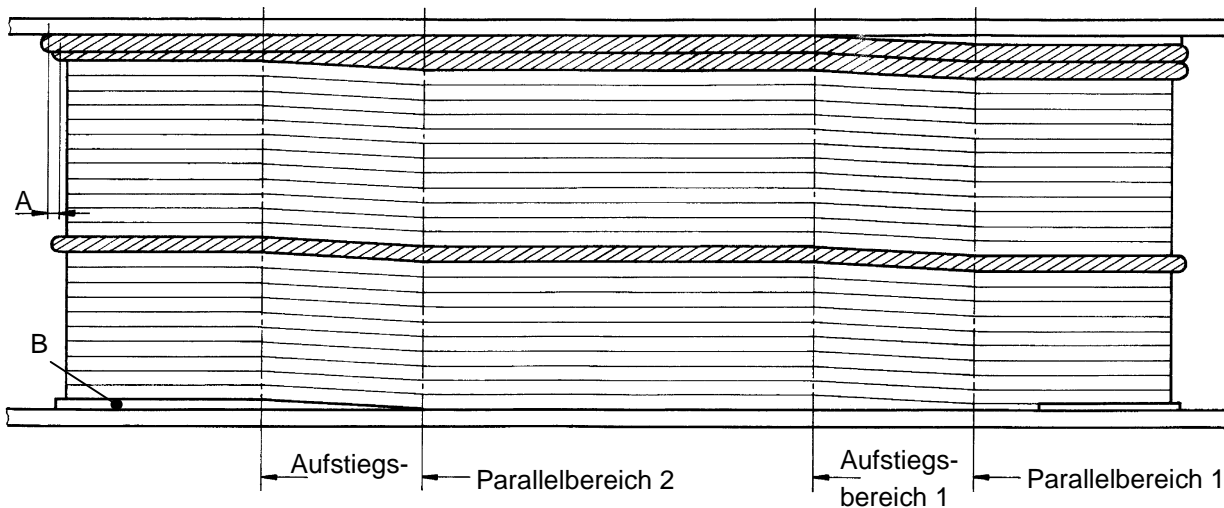


Bild 3: Abgewickelte Seiltrommel mit Lebusberillung; A) Aufstieg in die nächste Lage; B) Ausgleichs- und Steigungselement

abstand abgelenkt wird – charakterisiert (**Bild 3**). Die Winkelausdehnung der Parallel- und Aufstiegsbereiche variiert von Konstruktion zu Konstruktion und ist vom Einsatzfall, dem Seildurchmesser, den Trommelabmessungen und der Seilbiegesteifigkeit abhängig. Üblicherweise sind die Parallelbereiche größer als die Aufstiegsbereiche, sie nehmen ca. 50 bis 80% der Manteloberfläche ein. Um die Seilführung im Bereich des Seileinlaufs und beim Aufstieg zur nächsten Lage zu unterstützen, werden in der ersten Lage häufig Ausgleichs- und Steigungselemente angebracht (vgl. **Bild 3**).

Mit der Lebusberillung erfährt das Seil auch in den oberen Lagen eine definierte Führung, weil die Windungen der unteren Lage praktisch die Funktion der Mantelrillung übernehmen. Resultierend hieraus bildet sich ein geordnetes Seilpaket, das eine hohe Lagenanzahl und damit kompakte Seiltrommelkonstruktionen erlaubt. Die relativ kleine Win-

kelausdehnung der Aufstiegsabschnitte bewirkt eine Verkürzung des Kreuzungsbereichs der Windungen zweier benachbarter Lagen, wodurch der Seilverschleiß und das Abplatten des Seilquerschnitts örtlich begrenzt wird. Ein weiterer Aspekt, der im folgenden näher betrachtet werden soll, sind die gegenüber den glatten bzw. schraubenförmig verrillten Seiltrommeln veränderten Kontaktverhältnisse zwischen Seil und Bordscheibe.

3 Spulungsvorgang

Bei einer Seiltrommel mit Lebusberillung werden prinzipiell zwei Steigungsprozesse unterschieden:

- das Steigen (Weiterschleifen) der Windungen in Axialrichtung und
- das Aufsteigen der letzten Windung in die nächste Lage.

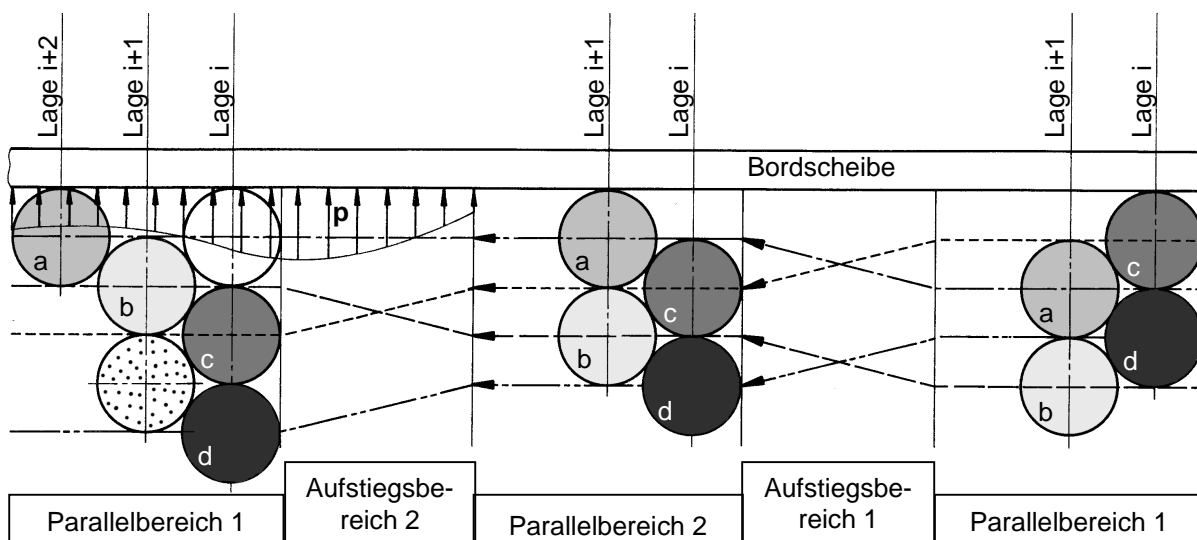


Bild 4: Darstellung des Spulungsvorgangs

Das Aufsteigen zur nächsten Lage vollzieht sich in mehreren Phasen. Die dabei herausgebildeten Kontaktverhältnisse sind maßgebend für die Belastung der Bordscheibe und damit auch für deren Dimensionierung. Das Aufsteigen des Seils kann wie folgt beschrieben werden (**Bild 4**):

1. Erreicht die letzte Windung a der Lage $i+1$ den Parallelbereich 2, so läuft es zunächst noch entlang der Bordscheibe, ohne eine Kraft auf diese auszuüben.
2. Im anschließenden Aufstiegsbereich 2 verhindert die Bordscheibe das axiale Weiterschieben des Seils, so dass dieses auf der darunter liegenden Windung (oder auf dem Aufstiegskeil) in die nächste Lage $i+2$ aufsteigt. In dieser Phase entwickelt sich ein Druck auf die Bordscheibe, dessen Wirkungslinie mit einer Spiralfunktion [3] beschrieben werden kann.
3. Im folgenden Parallelbereich 1 legt sich das Seil in die Lücke zwischen der letzten Windung der unteren Lage $i+1$ und der Bordscheibe. Durch diesen Keileffekt wird weiterhin Druck auf die Bordscheibe ausgeübt, die Wirkungslinie entspricht jetzt einem Kreisbogenabschnitt.
4. Im nächsten Aufstiegsbereich 1 verliert das Seil den Kontakt zur Bordscheibe, da es sich um eine Vollsteigung in Axialrichtung zur gegenüberliegenden Bordscheibe zurückbewegt.

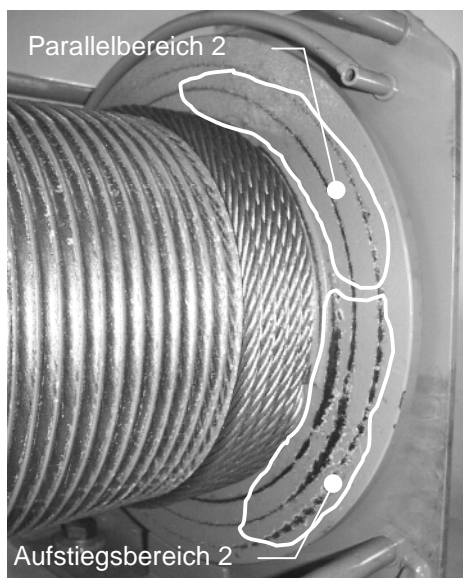


Bild 5: Kontaktspuren an einer Bordscheibe einschließlich einer groben Abgrenzung der maßgebenden Druckbereiche

Zusammenfassend betrachtet erstreckt sich der Kontaktbereich zwischen Bordscheibe und Seil über maximal 180° (ein Aufstiegsbereich und ein

Parallelbereich, **Bild 5**). Die Kontaktzonen zweier benachbarter Lagen liegen dabei für den Fall einer Seiltrommel mit ganzzahliger Windungsanzahl um 180° versetzt zueinander.

Die begrenzten Kontaktzonen führen zu einer asymmetrischen Belastung der Bordscheiben, die am Institut für Maschinenwesen der TU Clausthal mit Hilfe von Finite Elemente Simulationen und experimentellen Beanspruchungsanalysen untersucht wurde.

4 Windenprüfstand

Bild 6 zeigt eine Gesamtansicht des Prüfstandes, der eine Länge von 16 m misst. Als zentrale Baueinheit ist die Treibscheibenwinde HS 200 der Firma Rotzler zu nennen, mit der Zugkräfte bis zu 300 kN und Seilgeschwindigkeiten bis zu 40 m/min realisiert werden können. Weiterhin bietet diese Treibscheibenwinde die Möglichkeit, Seile mit Durchmessern zwischen 12 mm und 29 mm einzusetzen, womit sich ein umfangreiches Spektrum an Prüfaufgaben ergibt. Das nahezu lastfrei aus der Treibscheibenwinde auslaufende Seil wird auf eine Speichertrommel gewickelt, die in Abhängigkeit des verwendeten Seildurchmessers Seillängen zwischen ca. 400 m und ca. 600 m aufnimmt. Diese hohe Speicherkapazität gewährleistet die Durchführung von Versuchsreihen, bei denen die Prüfwinde in weiten Grenzen mehrlagig bewickelt werden kann.

Als maximale Abmessungen für den Prüfling sind ein bewickelter Durchmesser bis maximal 800 mm und eine Trommellänge bis zu 1000 mm (entspricht einem maximalen Ablenkungswinkel von $1,8^\circ$ im unbelasteten Zustand) zulässig. Die Untersuchung größerer Prüflinge oder glatter Trommeln mit Seilwickelvorrichtung ist, entsprechende Umbauarbeiten vorausgesetzt, im Einzelfall ebenfalls möglich.

Die Versuchsdurchführung erfolgt im automatischen Prüfbetrieb. Hierbei ist es möglich, die Seilzugkraft und -geschwindigkeit lagenweise zu variieren, so dass die Beanspruchungsverteilung einer mehrlagig bewickelten Trommel unter verschiedenen Lastsituationen (z.B. konstante Zuglast in allen Lagen oder Bewicklung mit niedrigen Seilzugkräften in den unteren und mit hohen in den oberen Lagen) analysiert werden kann. Durch die Vorgabe von Lastkollektiven kann ebenfalls das dynamische Betriebsverhalten von Seiltrommeln und der Einfluss des Seilverschleißes auf das Spulungsverhalten untersucht werden.

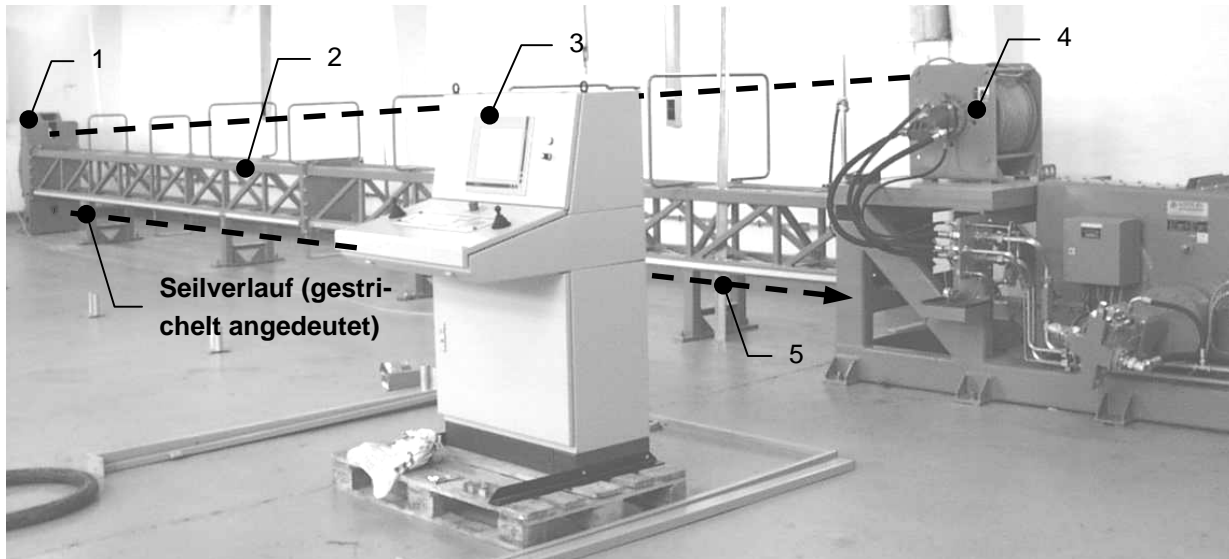


Bild 6: Universal-Seiltrommelprüfstand zum Zeitpunkt der Inbetriebnahme; 1) Umlenkscheibe, die sich über einen Hebel auf einer Kraftmeßdose zur Erfassung der Seilzugkraft abstützt; 2) Gittermast mit Seilfängen; 3) Steuerpult für den manuellen und automatischen Prüfstandsbetrieb; 4) Prüfwinde; 5) zur Bremswinde und Speichertrommel

5 Messung und Simulation der Bordscheibenbelastung

Die Erfassung der Bordscheibenbeanspruchungen erfolgte mit Hilfe einer telemetrisch arbeitenden DMS-Vielstellen-Messtechnik. In **Bild 7** ist die Verteilung der Messpositionen über dem Umfang und dem Radius einer Bordscheibe dargestellt. Die eingesetzten DMS-Gitter erlauben es, die Dehnungen in Radial- und Tangentialrichtung zu messen, womit der Spannungs- und Verformungszustand der Bordscheiben genau beurteilt werden kann.

Für einen Versuch mit konstanter Zugkraft von der ersten bis zur letzten Lage ergab sich über dem Umfang der Bordscheibe die in **Bild 8** gezeigte Spannungsverteilung (Radial-, Tangential- und Vergleichsspannung). An der betrachteten Bordscheibe steigt das Seil im 2. Aufstiegsbereich nach oben, so dass in diesem Winkelsektor hohe Beanspruchungen auftreten (vgl. **Bild 8**). Entsprechend den vorangegangenen Ausführungen bleibt das Seil auch im folgenden Parallelbereich 1 im Kontakt mit der Bordscheibe, weshalb die Druckbelastung (mit abnehmender Tendenz) erhalten bleibt. Der Spannungsverlauf bestätigt damit die anhand des Spulungsvorgangs erläuterte asymmetrische Belastung der Bordscheibe bei einer Seiltrommel mit Lebusberillung.

Bisher verwendete Berechnungsmethoden [4, 5, 6] gehen davon aus, dass die aus der Verformung des Seilpakets resultierende Axialkraft auf die Bord-

scheiben als Linienlast über den gesamten Umfang wirkt. Damit wird gleichzeitig eine symmetrische Belastung der Bordscheiben vorausgesetzt. Diese Betrachtungen stimmen mit den Belastungsverhältnissen von glatten und schraubenförmig verrillten Seiltrommeln, bei denen das Seil die Bordscheibe nahezu über den gesamten Umfang berührt, gut überein.

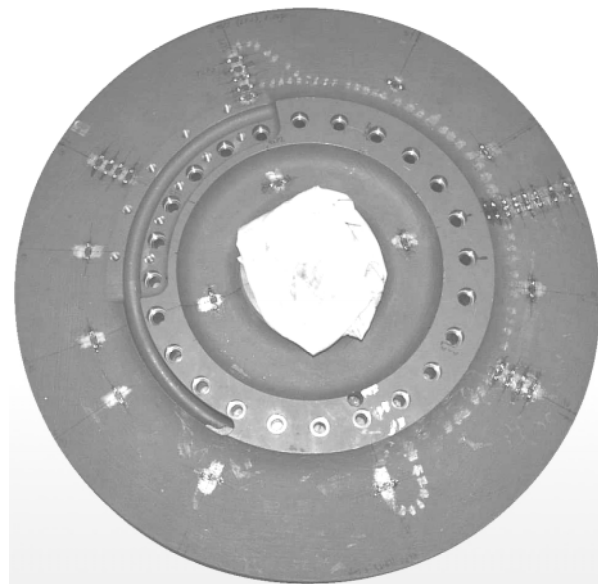


Bild 7: Verteilung der DMS-Messstellen über dem Umfang und dem Radius der Bordscheibe

Wie die experimentellen Untersuchungen gezeigt haben, entwickelt sich der Druck auf die Bordscheiben bei einer Seiltrommel mit Lebusberillung jedoch

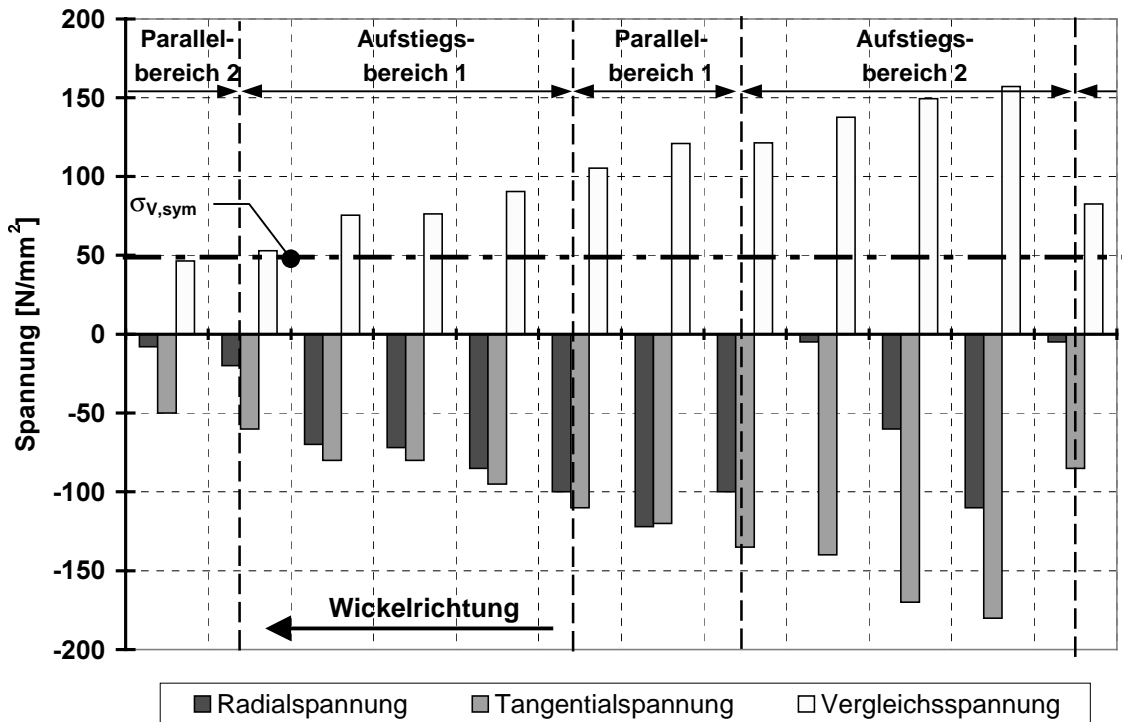


Bild 8: Spannungsverteilung über dem Umfang der Bordscheibe gemessen auf der 5. Lage ($\sigma_{v,sym}$ ist die erwartete Vergleichsspannung bei einer symmetrisch belasteten Bordscheibe)

nur in einem Winkelbereich von maximal 180°. Die erzeugten Beanspruchungen können deshalb lokal um das Dreifache höher sein als bisher in der Auslegung angenommen wird.

Die asymmetrische Verformung der Bordscheibe wurde auch mit Hilfe von Finite Elemente Simulationen nachgewiesen. Die Einleitung der Axialkräfte im FE-Modell erfolgte hierbei auf den Wirkungs-

linien der Kontaktzonen zwischen Seil und Bordscheibe, also auf einem Bogensegment (Spiralbogensegment im Aufstiegsbereich bzw. Kreisbogensegment im Parallelbereich). **Bild 9** zeigt das asymmetrische Verformungsbild einer derartig belasteten Bordscheibe, welches durch das lokale „Herausklappen“ des hochbelasteten Aufstiegsbe-

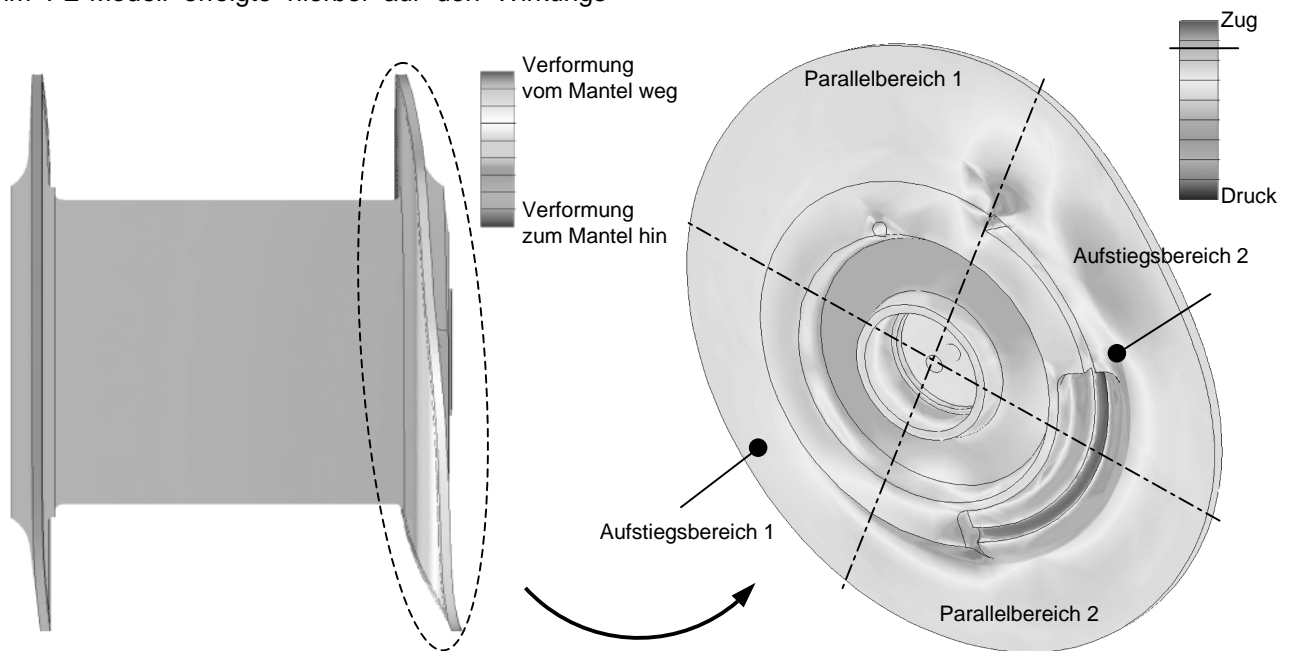


Bild 9: Asymmetrische Verformung und Beanspruchung der Bordscheibe einer Seiltrommel mit Lebusberillung; FE-Simulation (Seilzugkraft $F_S = 100$ kN, Mantelgrunddurchmesser $d_G = 467$ mm, Bordscheibendurchmesser $d_B = 855$ mm)

reichs (vgl. **Bild 8**) gekennzeichnet ist. Markant für diese Art der örtlich begrenzten Biegeverformung sind hohe tangentielle Zugspannungen an der Außenseite der Bordscheibe.

6 Fazit

Konventionelle, aber heute noch angewendete Berechnungsmethoden zur Ermittlung der Bordscheibenbeanspruchungen basieren auf der Annahme einer symmetrischen, über den Umfang der Bordscheibe gleichmäßig verteilten Axiallast, welche aus dem Linienkontakt der Seilpaketlagen resultiert.

Diese Vorgehensweise erfasst die Bordscheibenbeanspruchungen einer Seiltrommel mit Lebusberillung nur ungenügend. Begründet durch den Spulungsvorgang entsteht bei diesem Rillungssystem eine asymmetrische Druckverteilung über dem Kontaktbereich der einzelnen Lagen, der sich auf maximal 180° (ein Aufstiegs- und ein Parallelbereich) begrenzt. Bei mehrlagig bewickelten Seiltrommeln mit einem geometrischen Verhältnis von ca. $h_B/d_B < 0,025$ und ca. $d_B/d_G > 1,8$ (Bordscheibendicke h_B , Bordscheibendurchmesser d_B , Mantelgrunddurchmesser d_G) ergibt sich ein Verformungs- und Beanspruchungsverhalten, das sich von dem einer symmetrisch belasteten Bordscheibe deutlich unterscheidet.

Diesem Sachverhalt sollte der Konstrukteur besonders bei der Entwicklung von mehrlagigen Leichtbau-Seiltrommeln Beachtung schenken, um durch realitätsnahe Lastannahmen eine sichere Konstruktion zu erzielen.

7 Literaturhinweise

- [1] Ernst, H.: Die Hebezeuge – Grundlagen und Bauteile. Friedr. Vieweg & Sohn, Verlag, 1950
- [2] LeBus – system of controlled multilayer wire rope „spoolin“. Prospekt der Firma Le Bus International Engineers GmbH, München, 1969
- [3] Mupende, I.: Beanspruchungs- und Verformungsverhalten des Systems Trommelmantel – Bordscheiben bei mehrlagig bewickelter Seiltrommel unter elastischem und teilplastischem Werkstoffverhalten. Dissertation, TU Clausthal, 2001
- [4] Dietz, P.: Ein Verfahren zur Berechnung ein- und mehrlagig bewickelter Seiltrommeln. Dissertation, TH Darmstadt, 1971

- [5] Kraitschy, H.: Beanspruchung der Bordscheiben von Seiltrommeln. Dissertation, Rostock, 1973
- [6] Waters, E.O.: Rational Design of Hoisting Drums, The American Society of Mechanical Engineers. Transactions, 42 (1920)
- [7] Henschel, J.: Dimensionierung von Windentrommeln. Dissertation, TU Clausthal, 1999