

Die Trommelgestaltung bei mehrlagig bewickelten Seiltrommeln mit Kunststoffseilen

Dietz, P.; Mupende, I.; Schwarzer, T.

Im Bereich der Leichtbaufördermittel sollen zur weiteren Reduzierung des Gesamtgewichts der Seiltriebe vermehrt Kunststoffseile zum Einsatz kommen. Die im Vergleich zum Stahlseil unterschiedlichen Seileigenschaften lassen eine veränderte Beanspruchung der Seiltrommel vermuten. Dieser Artikel stellt einen Auszug aus Ergebnissen zur Untersuchung des Einflusses der Kunststoffseilparameter auf die Trommelbeanspruchung sowie Optimierungsansätze der Trommelgestaltung für die Bewicklung einer Trommel mit Kunststoffseilen dar.

In the field of lightweight conveyors synthetic ropes should be increasingly used for weight reduction of hoisting winches. These rope properties compared to regular steel ropes presume a different load mechanism of the hoisting drum. This article gives a short view about the design of winches in cases of using synthetic ropes.

1 Einleitung

Seiltrommel und Seil müssen als Komponenten des Seiltriebes hinsichtlich steigender Kundenanforderungen weiterentwickelt werden. In der Krananwendung beispielsweise werden bei ständig steigenden Traglasten immer größere Reichweiten der Ausleger gefordert. Gleichzeitig sollen Baugröße und Masse der Seiltriebe verringert werden, um eine möglichst flexible und mobile Anwendung der Fördermittel zu gewährleisten. Diese Forderungen erzwingen die Entwicklung von Leichtbaufördermitteln.

Als bewährtes Tragmittel in Seiltrieben hat sich bislang das Drahtseil erwiesen. Sein Zusammenwirken und seine Eigenschaften hinsichtlich Verschleiß und Lebensdauer bei mehrlagiger Bewicklung von Seiltrommeln sind hinreichend genau erforscht. Ein den gestiegenen Anforderungen gerechtes Leichtbaufördermittel ist allerdings nicht mehr ausschließlich mit Drahtseilen zu realisieren. Aus diesem Grund sollen auch in sicherheitsrelevanten Anwendungen hochfeste Chemiefaserseile (Kunststoffseile), deren Masse bezogen auf die Seillänge um ein vielfaches geringer als die der Drahtseile ist, zum Einsatz kommen, Mupende /1/.

Als laufendes Seil ist das Kunststoffseil derzeit noch wenig verbreitet; der Stand der Kenntnis ist gering, denn wissenschaftliche Untersuchungen zu über Seilrollen und Seiltrommeln (ein- oder mehrlagig) laufende Faserseile fanden bisher nur in einem geringen Umfang statt. Speziell der Einfluss der Seileigenschaften auf die Trommelbeanspruchung bei mehrlagiger Bewicklung und eine daraus resultierende notwendige Änderung der Trommelgestaltung wurden bislang noch nicht betrachtet.

2 Allgemeiner Aufbau und Belastung der Seiltrommel

Bild 1 zeigt den gängigen Aufbau einer Seiltrommel. Seine wesentlichen Elemente sind der Trommelmantel und die Bordscheiben.

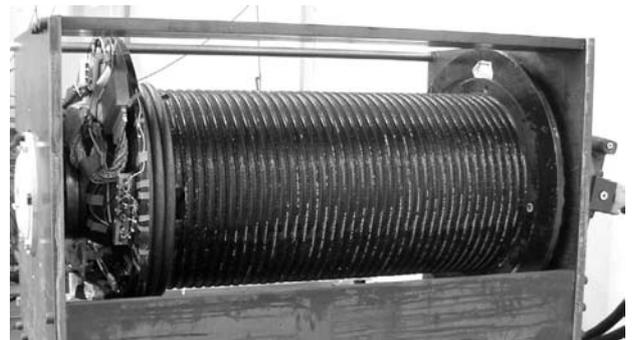


Bild 1: Seiltrommel auf dem Prüfstand

Die aus den Umschlingungskräften des Seiles resultierende Druckbelastung auf den Trommelmantel bildet die Hauptbeanspruchung der Seiltrommel. Eine weitere wesentliche Beanspruchung wird durch die axiale Belastung der Bordscheiben verursacht.

Grundlegend für die Bestimmung der Belastung einer Seiltrommel bei mehrlagiger Bewicklung sind die von Dietz /2/ entwickelten Berechnungsverfahren zur Ermittlung des Manteldrucks und der auf die Bordscheiben wirkenden Axialkräfte. Hier werden Mantel und Bordscheibe als zwei voneinander getrennte Systeme betrachtet. Mupende /3/ erweiterte die Theorie mit einem gekoppelten Modell, welches die Interaktion von Mantel und Bordscheibe bei Belastung der Trommel berücksichtigt.

2.1 Einfluss der LeBus-Berillung

Entgegen der Ergebnisse die unter der Annahme einer rotationssymmetrischen Beanspruchung des Trommelmantels erhalten werden, belegen Messungen an realen Seiltrommeln eine auftretende Unsymmetrie zwischen Aufstiegs- und Parallelbereich bei der Verwendung einer Seiltrommel mit *LeBus*-Berillung. **Bild 2** stellt den experimentell ermittelten Tangentialspannungsverlauf über dem Aufstiegs- und dem Parallelbereich einer Seiltrommel mit *LeBus*-Berillung dar.

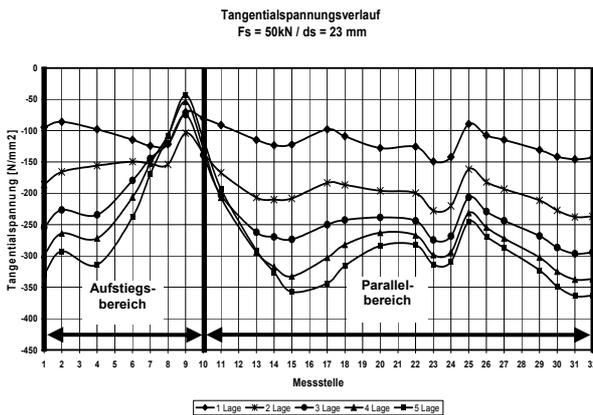


Bild 2: Tangentialspannungsverlauf an einer Seiltrommel mit *LeBus*-Berillung

Otto /4/ entwickelte für die Ermittlung des Beanspruchungsverhaltens einer mehrlagig bewickelten Seiltrommel mit *LeBus*-Berillung ein nicht-rotationssymmetrisches Belastungsmodell.

3 Kunststoffseile

Ein Kunststoffseil ist ein textiles Erzeugnis aus Seilgarnen; hergestellt wird es durch zwei- oder mehrstufiges Verseilen, Ummanteln, Verflechten, oder durch Seilformung ohne Drehung (Legen oder Verkleben). Die Kunststoffseileigenschaften werden durch den verwendeten Faserwerkstoff und die Seilmachart bestimmt. Grundsätzlich unterschieden wird zwischen Natur- und Chemiefasern (siehe **Bild 3**).

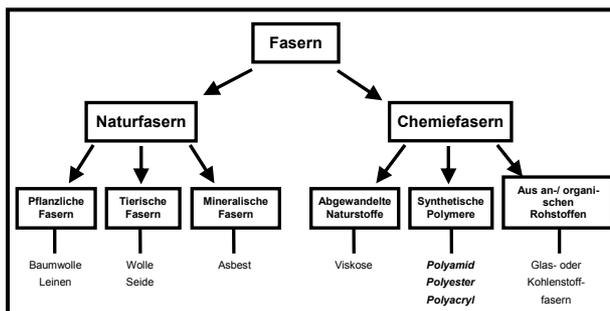


Bild 3: Einteilung der Faserwerkstoffe

Synthetisch hergestellte Polymere kommen aufgrund ihrer definiert einstellbaren und gut reproduzierbaren Eigenschaften in der Seilherstellung bevorzugt zum Einsatz.

3.1 Macharten von Kunststoffseilen

Generell unterscheidet man bei der Faserseilherstellung zwischen gedrehten und geflochtenen Seilen. Ziele der Herstellung sind eine möglichst hohe Komprimierung, ein geringes Seilgewicht (je Meter) und eine hohe Ausnutzung der Festigkeit der Einzelfaser. Das gedrehte Seil wird in mehreren Verseilstufen auf Seilerbahnen oder auf Seilerei-maschinen hergestellt. Das geflochtene Seil wird auf speziellen Seilflechtmaschinen hergestellt.

Geflochtene Seile lassen sich gegenüber den gedrehten Seilen technisch weit vielfältiger aufbauen. Beginnend beim 3-fach-Geflecht über herkömmliche 8-fach-Geflechte bis zu komplizierten Kernmantel-Verbundkonstruktionen aus unterschiedlichen Materialien können geflochtene Seile dem jeweiligen Verwendungszweck optimal angepasst werden.

4 Beanspruchungsanalyse

Zur Bestimmung einer für die mehrlagige Bewicklung mit einem Kunststoffseil angepassten Trommelgestaltung wurden folgende Untersuchungen mit Hilfe der Finiten Elemente Methode durchgeführt:

- Analyse des Einflusses verschiedener Kunststoffseilparameter auf die Trommelbeanspruchung,
- Untersuchung des Einflusses verschiedener Trommelgestaltungen (Stützscheibenanordnungen) auf das Belastungs- und Verformungsverhalten der Seiltrommel und
- Optimierung der Bordscheibengeometrie, die bei der Stützscheibenanordnung die günstigsten Eigenschaften in Hinblick auf Beanspruchung und Verformung der Seiltrommel ergeben hat.

4.1 Einfluss der Seilparameter auf die Trommelbeanspruchung

Das verwendete Modell der Seiltrommel für die Ermittlung des Einflusses der Seilparameter besteht aus einem 20° Sektor der Trommelgeometrie und dem dazugehörigen Seilpaket (siehe **Bild 4**). Das

vereinfachte Seilpaket setzt sich zusammen aus fünf Lagen mit jeweils 23 Windungen pro Seilage. Die Seilzugkraft F_s ist mit 20 kN für alle durchgeführten Berechnungen konstant. Als Trommelwerkstoff wird eine Gusskonstruktion aus GGG 60 angenommen.

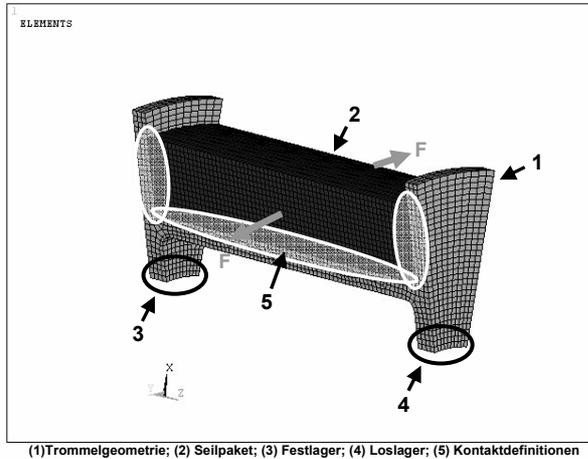


Bild 4: Berechnungsmodell

Die Trommelgeometrie wird in zwei Abmessungsvarianten untersucht ($D/d = 24$ und $D/d = 17$), um die guten Biegeewecheigenschaften von Kunststoffseilen beim Lauf über Seilscheiben und Seiltrommeln mit kleinen Durchmessern zu berücksichtigen.

Die Variation der Seilparameter erfolgt durch eine Kombination der in **Bild 5** dargestellten verschiedenen Moduln für die Quer- und Längsrichtung des Seils. Die daraus erhaltenen 16 möglichen Kombinationen der Seilpaketeigenschaften wurden berechnet.

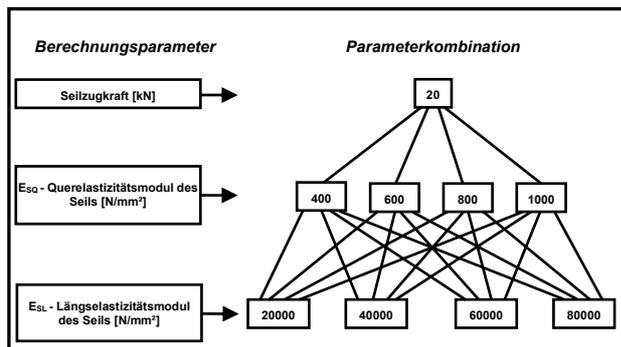


Bild 5: Kombinationsschema der Seilparameter

Bild 6 zeigt den Verlauf der Bordscheibenverformung für ein Durchmesser Verhältnis von $D/d = 24$ bei gleich bleibendem Querelastizitätsmodul E_{SQ} und veränderlichem Längselastizitätsmodul E_{SL} des Seilpaketes.

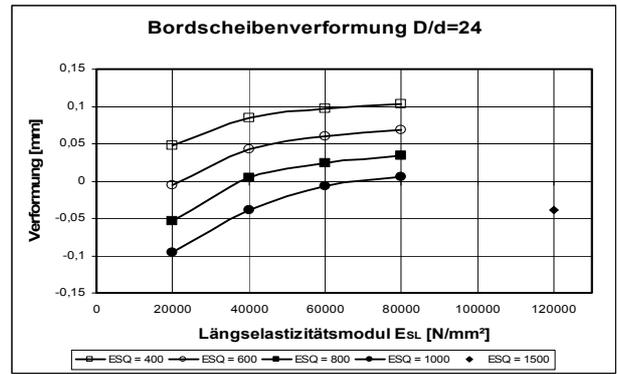


Bild 6: Bordscheibenverformung für $D/d = 24$

Der Anstieg der Verformung verläuft mit zunehmendem Längselastizitätsmodul degressiv. Dieser Verformungsverlauf stellt sich auch für die anderen Querelastizitätsmoduln ein, wobei mit zunehmendem E_{SQ} ein steilerer Anstieg zu beobachten ist.

In **Bild 7** ist der Verformungsverlauf der Bordscheiben in Abhängigkeit vom Längselastizitätsmodul E_{SL} bei gleich bleibendem Querelastizitätsmodul E_{SQ} für die Trommelgeometrie mit einem Durchmesser Verhältnis von $D/d = 17$ dargestellt:

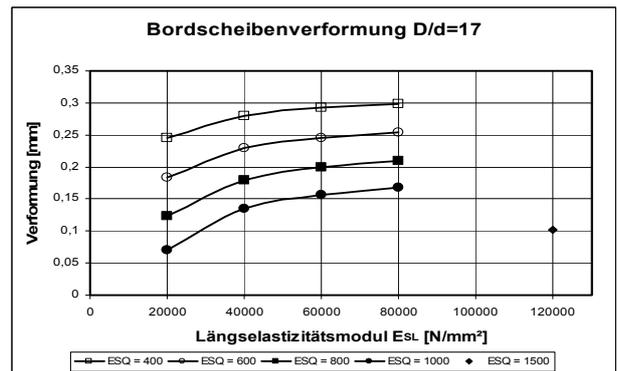


Bild 7: Bordscheibenverformung für $D/d = 17$

Die Verformungsverläufe weisen denselben Verlauf auf, wie er bei der Auswertung der Trommelgeometrie mit dem Durchmesser Verhältnis $D/d = 24$ erhalten wurde. Die maximale Verformung tritt (wie auch für $D/d = 24$) bei der Kombination aus kleinstem E_{SQ} (400 N/mm^2) und größtem E_{SL} (80000 N/mm^2) auf. Sie ist mit $\Delta u_z = 0,298$ mm im Vergleich zur Trommelgeometrie mit $D/d = 24$ ($\Delta u_z = 0,105$ mm) fast dreimal so groß.

Bild 8 und **Bild 9** zeigen bei gleich bleibendem Längselastizitätsmodul E_{SL} den Verlauf der Bordscheibenverformung über dem Querelastizitätsmodul E_{SQ} für beide Trommelgeometrien:

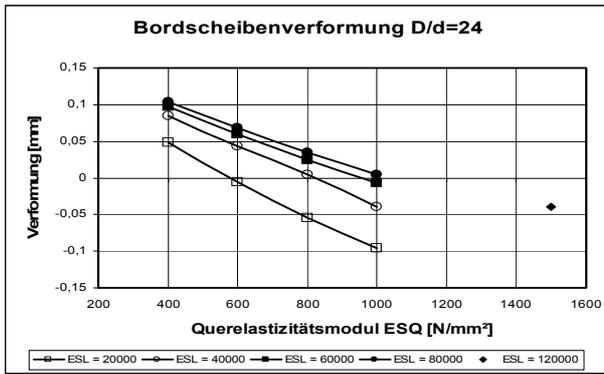


Bild 8: Bordscheibenverformung für $D/d = 24$

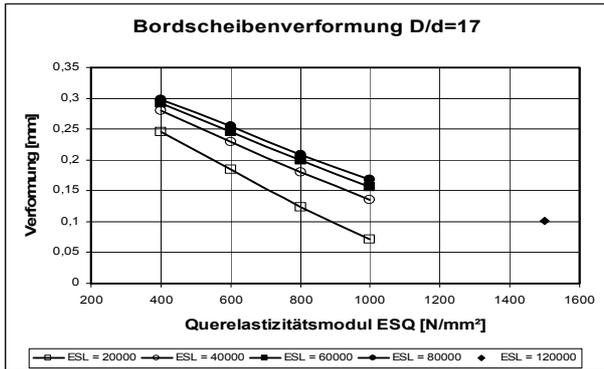


Bild 9: Bordscheibenverformung für $D/d = 17$

In den obigen Abbildungen ist ein nahezu linearer Zusammenhang zwischen der Bordscheibenverformung und dem Querelastizitätsmodul E_{SQ} zu erkennen. Die größten Verformungen der Bordscheibe treten analog zu **Bild 6** und **Bild 7** bei einem Querelastizitätsmodul von $E_{SQ} = 400 \text{ N/mm}^2$ und die geringsten bei einem Querelastizitätsmodul von $E_{SQ} = 1000 \text{ N/mm}^2$ auf.

Zum Vergleich der Bordscheibenbeanspruchung wird die auftretende radiale Biegespannung an den Innenseiten der Bordscheiben ausgewertet. In **Bild 10** und **Bild 11** ist ihr Verlauf über dem Längselastizitätsmodul E_{SL} für beide Trommelgeometrien dargestellt:

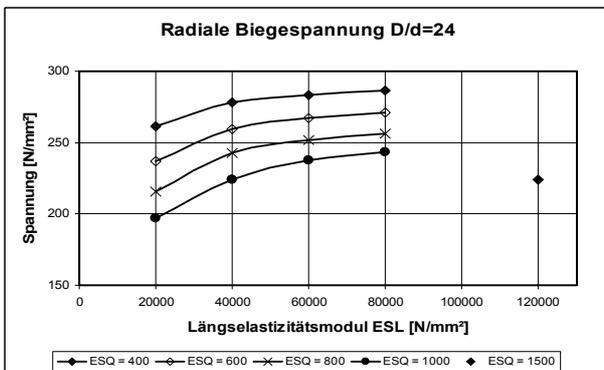


Bild 10: Radiale Biegespannung für $D/d = 24$

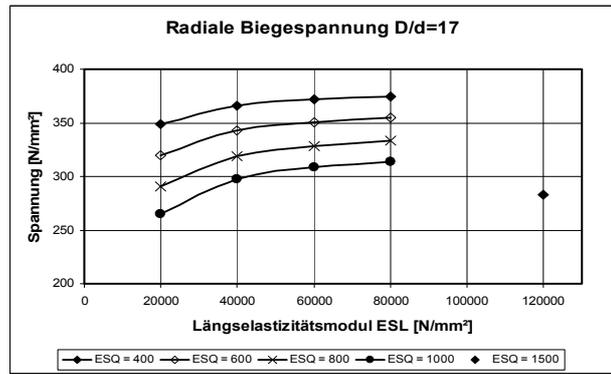


Bild 11: Radiale Biegespannung für $D/d = 17$

Die Verläufe der auftretenden radialen Biegespannung $\sigma_{r,B}$ weisen für beide Trommelgeometrien denselben Verlauf auf wie die der Verformung. Analog zu den vorherigen Darstellungen treten auch hier die maximalen Biegespannungen für beide Trommelgeometrievarianten bei der Kombination „kleinstes Querelastizitätsmodul und größtes Längselastizitätsmodul“ auf: Für $D/d = 24$ liegt die radiale Biegespannung bei $\sigma_{r,B} = 286 \text{ N/mm}^2$, für $D/d = 17$ wird ein $\sigma_{r,B} = 374 \text{ N/mm}^2$ erreicht. Dies entspricht einer Steigerung von 31 %.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass:

- die Höhe der Verformung und die Größe der auftretenden Spannung stärker vom Querelastizitätsmodul als vom Längselastizitätsmodul abhängen,
- der Verlauf in Abhängigkeit vom Querelastizitätsmodul einen linearen Zusammenhang aufweist,
- die auftretende Belastung abhängig von der Kombination aus E_{SQ} und E_{SL} ist und
- die Belastung mit kleiner werdendem Durchmesser Verhältnis D/d steigt.

4.2 Einfluss der Gestaltung auf die Trommelbeanspruchung

Um die Trommelgeometrie speziell für den Einsatz mit Kunststoffseilen zu optimieren, wird der Einfluss verschiedener Anordnungen der Stützscheiben am Trommelkörper für die bereits verwendeten Durchmesser Verhältnisse $D/d = 24$ und $D/d = 17$ untersucht. Für das Kunststoffseilpaket wird ein Querelastizitätsmodul $E_{SQ} = 800 \text{ N/mm}^2$ und ein Längselastizitätsmodul $E_{SL} = 60000 \text{ N/mm}^2$ festgelegt. Die Seilzugkraft F_S beträgt unverändert 20 kN.

Tabelle 1 gibt eine Übersicht über die untersuchten Stützscheibenanordnungskonzepte am Trommelkörper.

Konzept A (Grundmodell)	Konzept B	Konzept C	Konzept D	Konzept E
Grundmodell mit Stützscheiben direkt unter den Bordscheiben	Stützscheibe an der Loslagerseite nach außen verschoben	Stützscheibe an der Loslagerseite nach außen verschoben	Stützscheiben auf beiden Seiten nach innen verschoben	Stützscheiben auf beiden Seiten nach außen verschoben

Tabelle 1: Stützscheibenanordnungskonzepte

Bild 12 und **Bild 13** zeigen die Bordscheibenverformungen (beidseitig) der fünf Anordnungskonzepte für die beiden Durchmesserhältnisse:

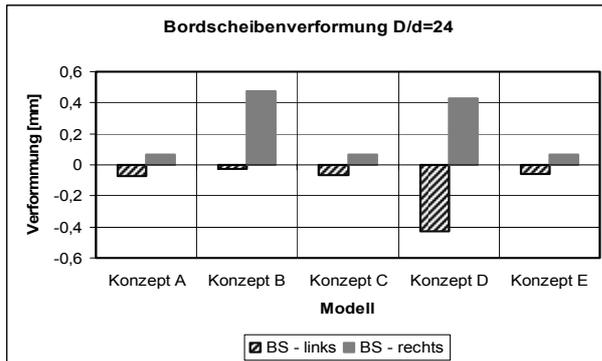


Bild 12: Bordscheibenverformung für D/d = 24

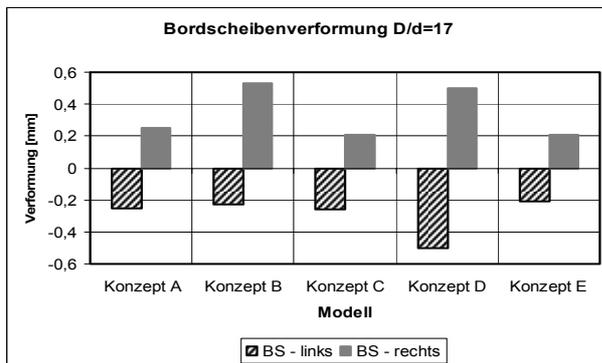


Bild 13: Bordscheibenverformung für D/d = 17

Die geringsten Bordscheibenverformungen weisen die Konzepte A, C und E auf, bei $D/d = 24$ sind die Verformungen an den beiden Bordscheiben nahezu symmetrisch. Für das Durchmesser Verhältnis $D/d = 17$ tritt bei Konzept C im Vergleich zu den beiden anderen Konzepten eine Unsymmetrie auf. Konzept B weist neben Konzept D in beiden Fällen die größten Verformungen der Bordscheiben auf, wobei für Konzept B aufgrund der Anordnung der Stützscheiben eine große Unsymmetrie auftritt.

Bezüglich der Bordscheibenverformung für die beiden untersuchten Durchmesserhältnisse ist festzustellen: Je geringer die Verformung für $D/d = 24$, desto größer die Zunahme der Verformung für $D/d = 17$. Die Umkehrung gilt ebenfalls: Je größer die Verformung für $D/d = 24$, desto geringer die an-

schließende Zunahme der Verformung für $D/d = 17$ (vergl. Konzept D).

Die an Außenseiten der Bordscheiben auftretenden radialen Biegespannungen sind für die beiden Durchmesserhältnisse in **Bild 14** und **Bild 15** dargestellt:

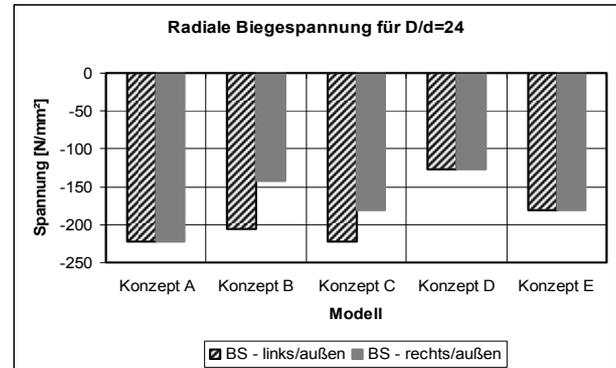


Bild 14: Radiale Biegespannung für D/d = 24

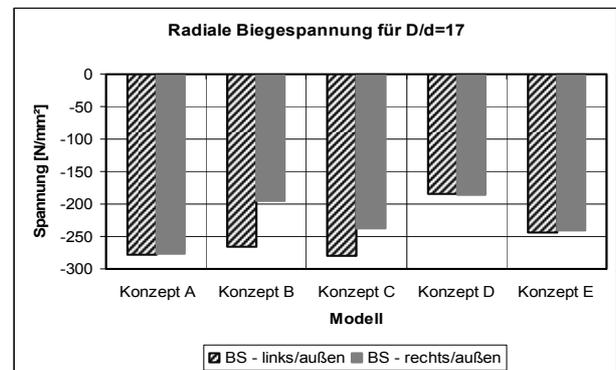


Bild 15: Radiale Biegespannung für D/d = 17

Den beiden Darstellungen ist zu entnehmen, dass das Konzept D mit den beiden nach innen verschobenen Stützscheiben jeweils die geringsten radialen Biegespannungen $\sigma_{r,B}$ aufweist. Die auftretenden Spannungen für Konzept D sind symmetrisch und betragen an den Außenseiten $\sigma_{r,B} = 125 \text{ N/mm}^2$ ($D/d = 24$) bzw. $\sigma_{r,B} = 180 \text{ N/mm}^2$ ($D/d = 17$).

Für eine Bewicklung der beiden Trommelgeometrien mit einem Kunststoffseil mit den oben angeführten Elastizitätsmoduln weist das Konzept D im Hinblick auf die Bordscheibenbeanspruchung die günstigste Anordnung der Stützscheiben auf, wobei die auftretenden Verformungen allerdings (im Vergleich zu den anderen Konzepten) mit am größten sind.

4.3 Optimierung der Trommelgeometrie

Die Bordscheiben von Konzept D sollen dahingehend optimiert werden, dass im Vergleich zum Ausgangsmodell im Verhältnis geringere Ver-

formungen und betragsmäßig kleinere Spannungen auftreten.

Einen Lösungsansatz bietet die Möglichkeit der Versteifung der Bordscheiben mit Hilfe einer Doppelwandkonstruktion oder einer Versteifung durch am Umfang verteilte Rippen. **Bild 16** zeigt die beiden Modelle der Gestaltungsoptimierung der Bordscheiben.

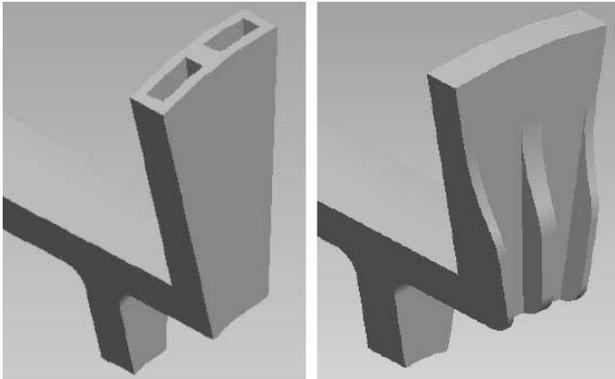


Bild 16: Optimierungsvorschläge

Bild 17 und **Bild 18** stellen die auf das Grundmodell bezogenen Verformungen der Bordscheiben und die radialen Biegespannungen der veränderten Bordscheibengeometrien dar:

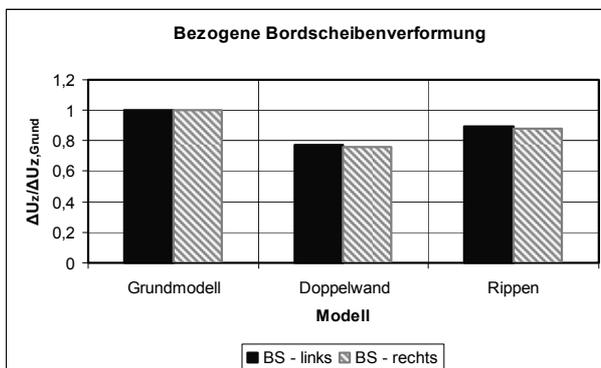


Bild 17: Bezogene Bordscheibenverformung

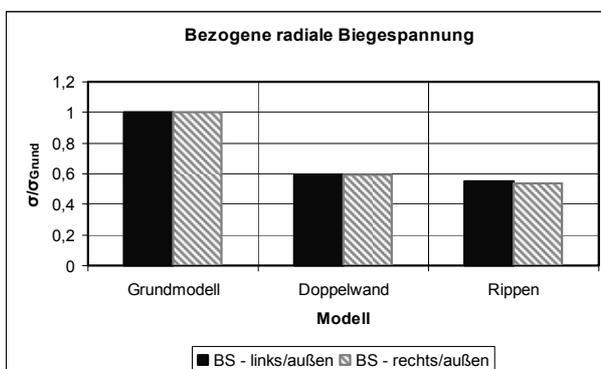


Bild 18: Bezogene radiale Biegespannung

Es ist zu erkennen, dass bei dem doppelwandigen Aufbau der Bordscheibe im Vergleich zum Grundmodell und zu der Verstärkung der Bordscheiben

durch Rippen die geringste Verformung der Bordscheiben auftritt. Sie beträgt nur noch 77 % der ursprünglichen Verformung, wohingegen bei dem Modell mit Rippen nur eine Absenkung auf 89 % der ursprünglichen Verformung stattfindet.

Bei der Reduzierung der auftretenden radialen Biegespannung sind die beiden Optimierungsvorschläge der Bordscheiben nahezu gleich. So beträgt sie bei der Doppelwandkonstruktion nur noch 60 % und bei der Verstärkung durch Rippen lediglich 55 % der auftretenden Werte des Grundmodells.

5 Zusammenfassung

Bei der Verwendung eines Kunststoffseil anstatt eines Drahtseils treten aufgrund der unterschiedlichen Seileigenschaften Veränderungen in der Beanspruchung der Seiltrommel auf. Diese Veränderung macht eine Anpassung der Trommelgestaltung erforderlich. Dazu sind verschiedene gestalterische Maßnahmen an der Trommelgeometrie möglich, wobei im Hinblick auf ein Leichtbaufördermittel auf eine reine Steigerung der Wandstärken verzichtet werden sollte. Speziell im Bereich der Bordscheiben wäre im Hinblick auf eine Reduzierung der auftretenden Verformungen und Spannungen eine Verstärkung durch Rippen oder ein doppelwandiger Aufbau der Bordscheiben geeignet.

6 Literatur

- /1/ Mupende, I.: Einfluss der Seildämpfung auf die Trommelbelastung bei Bewicklung mit Kunststoffseilen oder Kunststoff – Stahl Seilen; Institutsmitteilung Nr. 29, IMW Clausthal, 2004
- /2/ Dietz, P.: Ein Verfahren zur Berechnung ein- und mehrlagig bewickelter Seiltrommeln; Dissertation, TH Darmstadt, Darmstadt, 1971
- /3/ 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
- /4/ Otto, S.: Ein nicht-rotationsymmetrisches Belastungsmodell für die Ermittlung des Beanspruchungsverhaltens mehrlagig bewickelter Seiltrommeln; Dissertation, TU Clausthal, Clausthal, 2003