

Der Zielkonflikt bei der Auslegung von Seiltrommeln: Eine Parameterstudie zum Einfluss des D/d-Verhältnisses

Lontsi Nongni, B. B.; Lohrengel, A.

Die optimale Auslegung von Seiltrommeln stellt Konstrukteure vor einen Zielkonflikt: Während ein hohes Trommel-Seildurchmesser-Verhältnis (D/d) die Bordscheiben signifikant entlastet, führt es gleichzeitig zu erhöhten Spannungen im Trommelmantel. Aufbauend auf einer systematischen Sensitivitätsanalyse wird das D/d-Verhältnis als einer der dominierenden Einflussparameter identifiziert und in diesem Artikel in einer umfassenden Parameterstudie untersucht. Die Ergebnisse zeigen, dass eine Vergrößerung des D/d Verhältnisses zu einer klaren Entlastung der Bordscheiben führt, teilweise mit signifikanter Reduktion der Vergleichsspannungen, jedoch die Membranspannungen in der Trommelmitte substanzial erhöhen kann. Somit verschiebt sich die höchstbeanspruchte Stelle von den Bordscheiben in die Mantelmitte. Die Studie macht den grundlegenden Zielkonflikt in der Konstruktion von Seiltrommeln quantitativ sichtbar und bietet wertvolle Hinweise für die ingenieurtechnische Auslegung im Hinblick auf Sicherheit und Ressourceneffizienz.

The optimal design of rope drums presents engineers with a fundamental conflict of objectives: while a high drum-to-rope diameter ratio (D/d) significantly relieves stresses on the end flanges, it simultaneously leads to increased stresses in the drum shell. Building upon a systematic sensitivity analysis, the D/d ratio is identified as one of the dominant influencing parameters and is investigated in a comprehensive parameter study in this article. The results demonstrate that an increase in the D/d ratio leads to a clear stress reduction in the end flanges, partly with significant reductions in equivalent stresses, but can substantially increase the membrane stresses in the middle of the drum shell. Consequently, the region of highest stress shifts from the end flanges to the middle of the drum shell. This study quantitatively illustrates the inherent conflict of objectives in rope drum design, offering valuable insights for engineering design with regard to safety and resource efficiency.



Einleitung

Die Seiltrommel ist eine zentrale, sicherheitsrelevante Komponente in der Hebe- und Fördertechnik, deren zuverlässige Auslegung maßgeblich zur Betriebs- und Anlagensicherheit beiträgt. Angesichts steigender Anforderungen an Leichtbau, Ressourceneffizienz und Lebensdauer der Anlagen gewinnen präzise und

ingenieurwissenschaftlich fundierte Berechnungsmethoden zunehmend an Bedeutung. Während sich in der Forschung detaillierte analytische Verfahren für die Spannungsanalyse von Seiltrommeln etabliert haben, erschwert deren Komplexität jedoch noch immer eine breite Anwendung in der industriellen Praxis. In frühen Entwurfsphasen oder bei Variantensimulationen ist ein reduzierter, auf die dominierenden Systemparameter konzentrierter Berechnungsansatz besonders gefragt.

Ein wesentlicher Einflussparameter ist hierbei das Verhältnis von Trommel- zu Seildurchmesser (D/d). Es beeinflusst maßgeblich sowohl die Belastung der Bordscheiben als auch die Spannungszustände im Trommelmantel, wobei eine Erhöhung des D/d -Verhältnisses mit gegensätzlichen Effekten auf diese beiden kritischen Bauteile einhergeht. Dies führt zu einem bislang wenig quantifizierten Zielkonflikt, der für die technische Auslegung von zentraler Bedeutung ist: Die Beanspruchung lässt sich nicht gleichzeitig in beiden Bauteilen minimieren.

In diesem Beitrag wird mittels einer umfassenden Parameterstudie die funktionale Abhängigkeit der lokalen Spannungen innerhalb der Seiltrommel vom D/d -Verhältnis analysiert und damit den Zielkonflikt in der Konstruktion quantitativ erlebbar zu machen.

Gegenstand und Zielstellung der Untersuchung

Im Zentrum dieser Untersuchung steht die systematische Analyse der Spannungszustände innerhalb einer mit mehreren Lagen belegten Seiltrommel unter Variation des Trommel-Seildurchmesser-Verhältnisses (D/d). Ziel ist es, die durch eine Änderung dieses Verhältnisses hervorgerufenen Effekte auf kritische Beanspruchungen der Bauteile, insbesondere Trommelmantel und Bordscheiben, zu quantifizieren und den damit verbundenen Zielkonflikt bei der mechanischen Auslegung sichtbar zu machen.

Die Basis der parametrischen Analyse bildet eine bereits in Forschung und Praxis etablierte, analytische Berechnungsmethode für Seiltrommeln, wie sie am Institut für Maschinenwesen (IMW) der TU Clausthal entwickelt wurde. Es werden die wichtigsten Konstruktions- und Materialparameter kontrolliert festgelegt, um den Einfluss des D/d -Verhältnisses isoliert betrachten zu können. Die Ergebnisse liefern eine quantitative Grundlage für die Auslegungsentscheidung hinsichtlich dieses maßgeblichen Geometrieparameters.

Modellierung und Berechnungsgrundlagen

Ausgangspunkt der Analyse ist ein mechanisches Ersatzmodell der Seiltrommel, das in Anlehnung an die Methodik nach Mupende /1/ den Trommelmantel als rotationssymmetrische Kreiszylinderschale und die Bordscheiben als Kreisringplatten abbildet. Die Spannungs- und Verformungsberechnung erfolgt auf

Basis der linearen Schalen- und Plattentheorie unter der Annahme eines homogenen, isotropen und im Wesentlichen elastischen Materialverhaltens.

Die Belastung des Trommelmantels wird im Modell als radiale Druckverteilung aus den aufgewickelten Seillagen angesetzt, während die Bordscheiben durch die aus dem Wickelpaket resultierenden axialen Linienkräfte beansprucht werden. Beide Lastarten werden durch die Seilparameter und insbesondere das D/d-Verhältnis beeinflusst.

Die verwendeten Berechnungsgleichungen und die Validierung der Methode basieren auf einer umfangreichen Literatur- und Forschungsgrundlage, wobei die Referenzberechnungen mit dem hauseigenen Programm „Seilwinde.exe“ durchgeführt wurden. Komplexe Materialeffekte wie Plastizität oder lokale Kontaktphänomene werden im Rahmen dieser Studie zugunsten einer klaren Parametrierung nicht vertieft betrachtet.

Geometrie und Randbedingungen der untersuchten Seiltrommel

Für die Parameterstudie wird eine repräsentative Seiltrommel ausgewählt, deren Geometrie und Materialkennwerte sich an aktuellen industriellen Anwendungen orientieren. Die untersuchte Trommel ist für die Aufnahme eines Stahldrahtseils mit einem Nenndurchmesser $d=14$ mm ausgelegt. Die übrigen Geometrie- und Materialdaten (siehe Tabelle 1) sind nach Stand der Technik gewählt und werden im Verlauf der Studie konstant gehalten, um den Einfluss des D/d-Verhältnisses isoliert herausstellen zu können.

Tabelle 1: Geometrie- und Materialdaten des untersuchten Systems aus Seiltrommel und Seil

Mantel			Bordscheibe		
Innendurchmesser	[mm]	208	Außendurchmesser	[mm]	450
Grunddurchmesser	[mm]	252	Wandstärke	[mm]	20
Mantellänge	[mm]	330,3	E-Modul	[MPa]	210000
Fließgrenze	[MPa]	900	Querkontraktionszahl	-	0,25
E-Modul	[MPa]	210000	Seil		
Querkontraktionszahl	-	0,25	Seildurchmesser	[mm]	14
Windungsabstand	[mm]	14,7	Längselaszititätsmodul	[MPa]	110000
Reibbeiwert	-	0,18	Nutzlast	[N]	38000

Vorgehen der Parameterstudie

Die Auswirkungen des D/d-Verhältnisses auf die Spannungsverteilung werden mittels einer systematischen Parameterstudie untersucht. Hierzu wird das D/d-Verhältnis im Bereich von 18 bis 30 stufenweise variiert. Dabei ist für jedes festgelegte D/d-Verhältnis ein vollständiger Belastungsfall mit identischer Betriebsbeanspruchung berechnet. Die Änderung des D/d-Wertes erfolgt durch Anpassung des Trommeldurchmessers, für jede Variation werden die zugehörigen Bordscheibendurchmesser und relevanten Lagen angepasst, sodass stets eine technisch realistische Wickelgeometrie gegeben ist.

Für jedes Modell werden die resultierenden radiale, tangentiale und axiale Spannungskomponenten sowohl im Trommelmantel als auch in den kritischen Bereichen der Bordscheiben ausgewertet. Die maßgeblichen Kennwerte sind dabei die lokalen Vergleichsspannungen (nach von Mises), die als Beurteilungsmaßstab für die strukturelle Beanspruchung dienen.

Der Fokus der Auswertung liegt darauf, die Änderung der Maximalspannungen in Abhängigkeit vom D/d-Verhältnis übersichtlich und nachvollziehbar darzustellen, um den Zielkonflikt in der Konstruktion der Seiltrommel quantitativ herauszuarbeiten.

Ergebnisse der Parameterstudie

Entwicklung der Spannungen in den Bordscheiben

Die Bordscheiben sind maßgeblich durch die axialen Kräfte aus dem Wickelpaket beansprucht. Die Analyse zeigt, wie die Variation des D/d-Verhältnisses die lokalen Spannungszustände in diesen kritischen Bauteilen beeinflusst.

Radiale Spannungen

Die Entwicklung der radialen Spannungen in den Bordscheiben zeigt einen überwiegend degressiven Verlauf mit steigendem D/d-Verhältnis. Dies ist besonders ausgeprägt an den äußeren Seiten beider Bordscheiben zu beobachten. Beispielsweise sinkt die radiale Spannung an der äußeren Seite der linken Bordscheibe von 160,7 MPa bei D/d = 18 auf 112,9 MPa bei D/d = 30 (siehe Tabelle 2), was einer signifikanten Reduktion von rund 30 % entspricht. Dieser Trend wird in Abbildung 1 durch sinkende Balken verdeutlicht.

Physikalisch lässt sich dieses Verhalten durch die veränderte Biegesteifigkeit der Plattenstruktur erklären: Eine Trommel mit größerem Durchmesser führt bei gleicher Dicke zu einer geringeren Krümmung der Bordscheibe, was die Biegespannungen reduziert.

Eine bemerkenswerte Ausnahme dieses monotonen Trends findet sich im hochbelasteten Anschlussbereich der linken Bordscheibe. Hier zeigt sich ein nicht-lineares Verhalten: Die Spannung steigt von einem Ausgangswert von 642,0 MPa zunächst auf ein lokales Maximum von 704,0 MPa bei einem D/d-Verhältnis von 22, bevor sie bei größeren Verhältnissen wieder deutlich auf 491,6 MPa abfällt. Dieses Phänomen ist in Abbildung 1 (Balken für D/d = 20 und D/d = 22 über dem Referenzwert von 1) hervorgehoben. Eine weitere Anomalie tritt an der äußeren Seite der rechten Bordscheibe auf, wo die radiale Spannung bei D/d = 22 und D/d = 24 jeweils 123,8 MPa beträgt. Diese Beobachtungen deuten auf eine komplexe strukturmechanische Interaktion zwischen der Bordscheibenverformung und der elastischen Einspannung durch den Trommelmantel hin, die bei spezifischen Geometrieverhältnissen zu lokalen Spannungsüberhöhungen führt.

Tabelle 2: Radiale Spannungen der Bordscheiben in MPa

D/d-Verhältnis	18	20	22	24	26	28	30
BS links, äußere Seite	160,7	145,1	134,7	128,0	122,8	117,8	112,9
BS links, Anschlussseite	642	699,2	704	658,4	597,2	539,9	491,6
BS rechts, äußere Seite	139,6	131,3	123,8	123,8	110,5	104,6	99,3
BS rechts, Anschlussseite	421,3	398,1	376,0	356,1	338,4	322,6	308,6

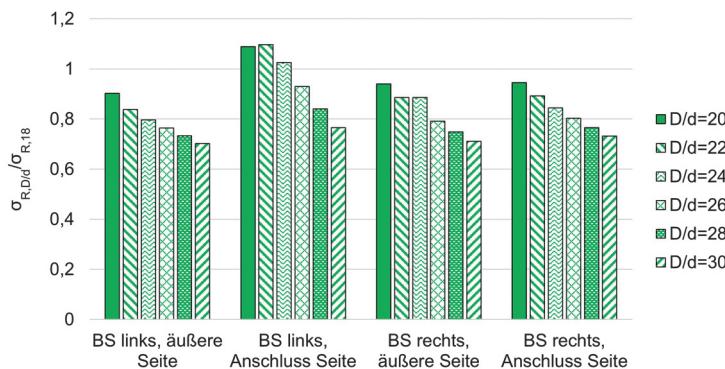


Abbildung 1: Entwicklung der radialen Spannungen der Bordscheiben

Tangentielle Spannungen

Die Analyse der tangentialen Spannungen zeigt insbesondere im Bereich der Bordscheiben deutliche Unterschiede in Betrag und Verlauf in Abhängigkeit vom D/d-Verhältnis. Auffällig ist die Entwicklung an der äußeren Seite der rechten Bordscheibe: Während bei D/d = 18 noch eine geringe Zugspannung von 14,4 MPa

vorliegt, wechselt das Vorzeichen bereits bei $D/d = 22$ zu einer leichten Druckspannung von $-5,2$ MPa. Mit weiter steigendem D/d -Verhältnis nimmt die Druckspannung zu und erreicht bei $D/d = 30$ einen Wert von $-26,4$ MPa (siehe Tabelle 3).

In den Anschlussbereichen der Bordscheiben zeigen sich ebenfalls deutliche, jedoch in der Größenordnung wesentlich größere Schwankungen. Im Anschlussbereich der linken Bordscheibe nimmt die tangentiale Druckspannung von $-201,8$ MPa ($D/d = 18$) auf ein Maximum von $-236,8$ MPa ($D/d = 22$) zu und reduziert sich anschließend wieder auf $-156,0$ MPa ($D/d = 30$). Im Anschlussbereich der rechten Bordscheibe ist ein kontinuierlicher Rückgang der Druckspannung um rund 40 % zu beobachten ($-156,7$ MPa auf $-93,7$ MPa).

Tabelle 3: Tangentiale Spannungen der Bordscheiben in MPa

D/d-Verhältnis	18	20	22	24	26	28	30
BS links, äußere Seite	41,2	40,4	34,5	23,9	12,8	3,2	-4,6
BS links, Anschlussseite	-201,8	-231,2	-236,8	-220,7	-197,3	-175,0	-156,1
BS rechts, äußere Seite	14,4	3,6	-5,2	-5,2	-18	-22,6	-26,4
BS rechts, Anschlussseite	-156,7	-142,7	-129,9	-118,8	-109,2	-100,9	-93,7

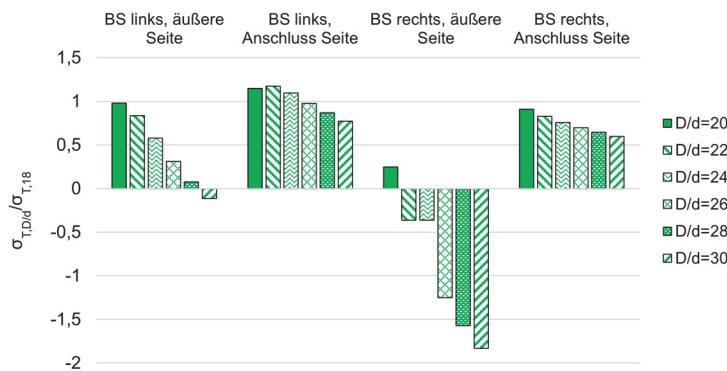


Abbildung 2: Entwicklung der tangentialem Spannungen der Bordscheiben

Es ist wichtig zu berücksichtigen, dass kleinere Spannungswerte, wie die an der äußeren Seite der rechten Bordscheibe, im Vergleich zu den in den Anschlussbereichen auftretenden Druckspannungen geringere Auswirkungen auf die Betriebsfestigkeit haben. Die Systemzuverlässigkeit sollte primär auf die Zonen mit den höchsten absoluten Spannungsspitzen, insbesondere im Anschlussbereich der Bordscheiben, fokussiert werden.

Vergleichsspannung

Die nach der Gestaltänderungsenergiehypothese gebildeten Vergleichsspannungen fassen die mehrachsigen Spannungszustände zusammen. Ihre Entwicklung wird von den dominanten Trends der Einzelspannungskomponenten geprägt. Im Anschlussbereich der linken Bordscheibe wird, analog zur radialen Spannung, ein Spannungsmaximum bei $D/d = 22$ mit einem Wert von 872,7 MPa erreicht (siehe Tabelle 4). Dies ist der höchste Spannungswert der gesamten Analyse. An allen anderen Positionen zeigt die Vergleichsspannung eine tendenziell degressive Entwicklung (Abbildung 3). Dies deutet darauf hin, dass trotz der ausgeprägten Änderungen in der Tangentialspannung die Gesamtbeanspruchung in den meisten Bereichen durch eine Vergrößerung des D/d -Verhältnisses reduziert werden kann, obwohl lokale Überhöhungen bei bestimmten Verhältnissen auftreten können.

Tabelle 4: Vergleichsspannungen der Bordscheiben in MPa

D/d-Verhältnis	18	20	22	24	26	28	30
BS links, äußere Seite	148,8	133,6	124,7	121,0	119,6	118,6	117,4
BS links, Anschlussseite	791,6	865,7	872,7	816,0	739,5	667,9	607,5
BS rechts, äußere Seite	136,0	132,1	128,6	128,6	122,1	119,0	116,0
BS rechts, Anschlussseite	542,8	510,7	480,4	453,3	429,4	408,3	389,5

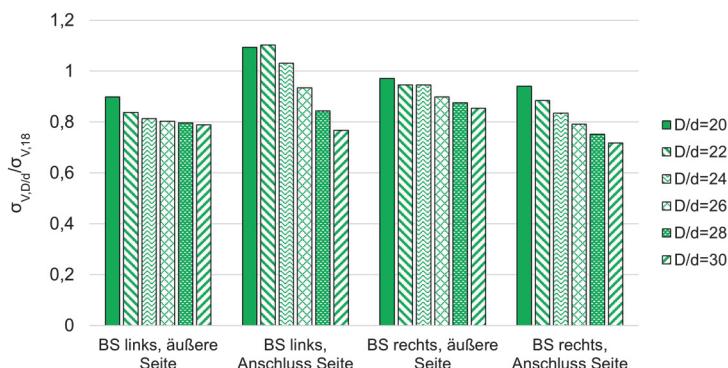


Abbildung 3: Entwicklung der Vergleichsspannungen der Bordscheiben

Entwicklung der Spannungen im Trommelmantel

Die Analyse des Trommelmantels zeigt, wie sich die veränderte Geometrie auf die Beanspruchungen in der zylindrischen Schale auswirkt, die primär durch den radialen Seildruck belastet wird.

Axialspannungen

Die Axialspannungen im Mantel weisen ein stark positionsabhängiges Verhalten auf. An den Rändern (Position 0 und 330,3 mm), wo die Einspannung in die Bordscheiben dominiert, nehmen die Druckspannungen bei steigendem D/d-Verhältnis tendenziell ab, wie in Abbildung 4 veranschaulicht. Im Gegensatz dazu steigen die Zugspannungen im mittleren Bereich des Mantels (Position 100-200 mm) deutlich an. An der Position 200 mm beispielsweise erhöht sich die Spannung von 10,73 MPa bei D/d = 18 auf 51,19 MPa bei D/d = 30 (siehe Tabelle 5), was einem relativen Anstieg um den Faktor 4,7 entspricht.

Dieser Effekt lässt sich durch das veränderte Schalenträgerverhalten erklären: Eine Trommel mit größerem Durchmesser ist bei gleicher Wandstärke relativ "dünnewandiger". Ihr Verhalten nähert sich dem einer Membran an, was zu höheren axialen Membranspannungen in der Mitte führt, während die Biegespannungen an den eingespannten Rändern abnehmen.

Tabelle 5: Axialspannungen des Trommelmantels in MPa

Position auf Mantel in mm	0	100	200	300	330,3
D/d=18	-621,57	71,11	10,73	60,35	-397,51
D/d=20	-683,95	86,87	14,17	72,19	-375,84
D/d=22	-691,00	98,52	19,52	82,98	-355,02
D/d=24	-645,85	106,13	26,26	92,24	-336,33
D/d=26	-584,40	112,34	33,92	99,99	-319,81
D/d=28	-526,86	118,63	42,27	106,38	-305,20
D/d=30	-478,47	125,38	51,19	111,60	-292,22

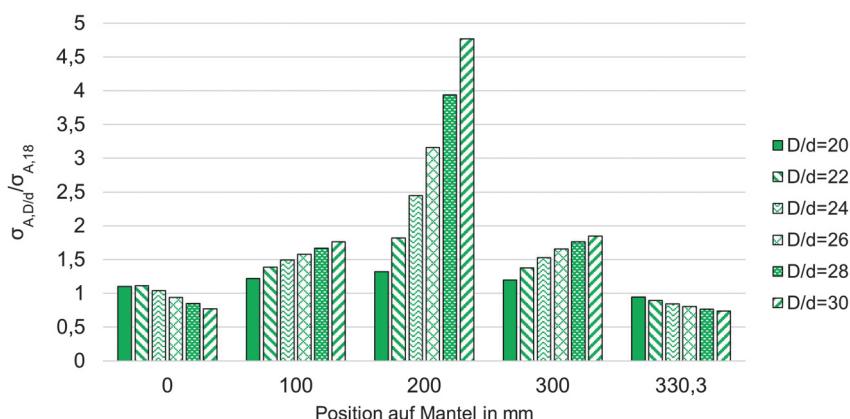


Abbildung 4: Entwicklung der Axialspannungen des Trommelmantels

Innere und äußere Tangentialspannungen

Sowohl die inneren als auch die äußeren Tangentialspannungen zeigen über die gesamte Mantellänge einen klaren Trend: Ihre Beträge nehmen mit steigendem D/d-Verhältnis zu (siehe Abbildung 5 und Abbildung 6). An der Position 200 mm steigt die innere Druckspannung von -407,03 MPa (D/d = 18) auf einen betragsmäßigen Maximalwert von -539,19 MPa (D/d = 30) (siehe Tabelle 6), eine Zunahme von über 32 %. Dieses Verhalten steht im Einklang mit der Kesselformel, wonach die Tangentialspannung direkt proportional zum Durchmesser ist. Der größere Durchmesser führt zwangsläufig zu höheren Tangentialspannungen. Der Verlauf der äußeren Tangentialspannung (Abbildung 6) ist eine Überlagerung aus dieser Membranspannung und der Biegespannung, wird aber ebenfalls vom ansteigenden Membrananteil dominiert.

Tabelle 6: Innere Tangentialspannungen des Trommelmantels in MPa

Position auf Mantel in mm	0	100	200	300
D/d=18	-160,57	-385,18	-407,03	-182,54
D/d=20	-190,80	-406,82	-442,02	-196,26
D/d=22	-202,38	-424,44	-470,48	-205,64
D/d=24	-196,79	-440,83	-493,41	-211,84
D/d=26	-184,54	-455,51	-511,94	-215,73
D/d=28	-171,87	-467,81	-526,98	-217,97
D/d=30	-160,74	-477,69	-539,19	-219,03

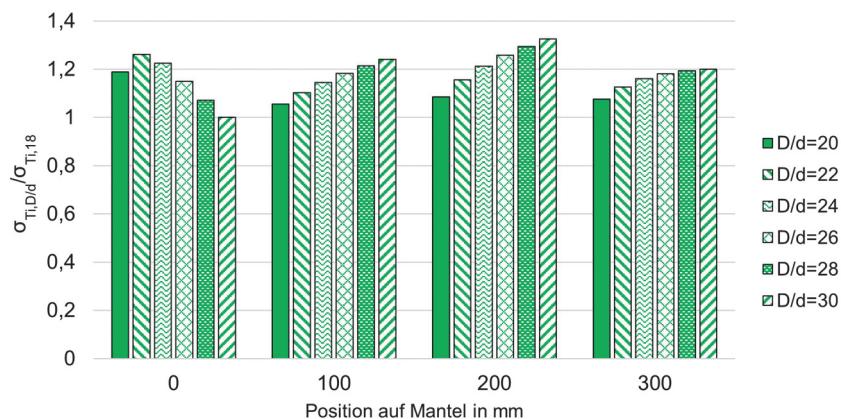


Abbildung 5: Entwicklung der inneren Tangentialspannungen des Trommelmantels

Tabelle 7: Äußere Tangentialspannungen des Trommelmantels in MPa

Position auf Mantel in mm	0	100	200	300
D/d=18	159,20	-342,74	-333,22	-170,34
D/d=20	161,51	-376,06	-372,24	-191,63
D/d=22	153,88	-403,32	-406,13	-208,41
D/d=24	136,72	-427,00	-435,39	-221,36
D/d=26	117,79	-447,97	-460,76	-231,24
D/d=28	101,15	466,41	-482,92	-238,71
D/d=30	87,53	-482,50	-502,42	-244,31

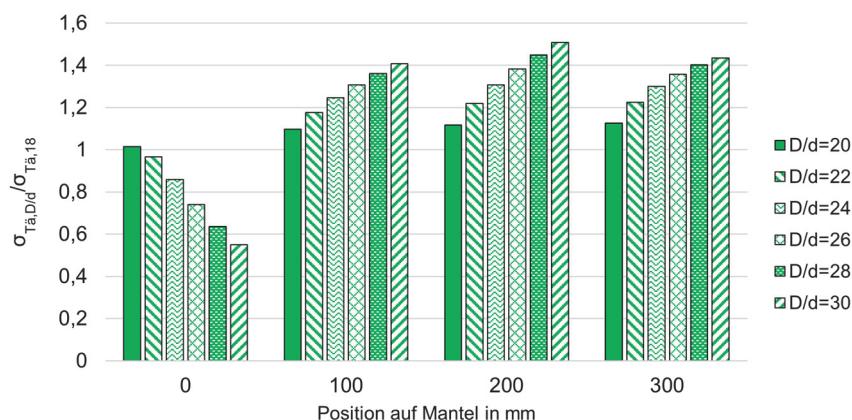


Abbildung 6: Entwicklung der äußeren Tangentialspannungen des Trommelmantels

Vergleichsspannungen

Die Entwicklung der Vergleichsspannungen im Mantel ist eine Synthese der zuvor beschriebenen Effekte. An den Rändern (Position 0 und 300 mm), wo die Biege- und Axialdruckspannungen dominieren, ist der Verlauf degressiv. In der Mitte des Mantels (Position 100 bis 200 mm) ist der Trend hingegen eindeutig progressiv. Hier dominiert der starke Anstieg der Tangential- und axialen Membranspannungen, wie in Abbildung 7 zu sehen. Der höchste Anstieg wird an der Position 200 mm verzeichnet, wo die Vergleichsspannung (Druckspannung) von 412,54 MPa auf 566,61 MPa bei D/d = 30 ansteigt (siehe Tabelle 8).

Diese Erkenntnis ist für die Konstruktionspraxis von entscheidender Bedeutung: Eine Vergrößerung des Trommeldurchmessers zur Entlastung der Bordscheiben kann die kritischste, höchstbeanspruchte Stelle von den Rändern in die Mitte des Trommelmantels verlagern.

Tabelle 8: Vergleichsspannungen des Trommelmantels in MPa

Position auf Mantel in mm	0	100	200	300
D/d=18	596,08	425,44	412,54	223,43
D/d=20	646,54	456,72	449,32	244,56
D/d=22	648,72	481,53	480,59	261,01
D/d=24	605,28	502,57	507,12	273,49
D/d=26	548,26	521,04	529,79	282,78
D/d=28	495,43	537,23	549,42	289,59
D/d=30	541,22	551,36	566,61	294,48

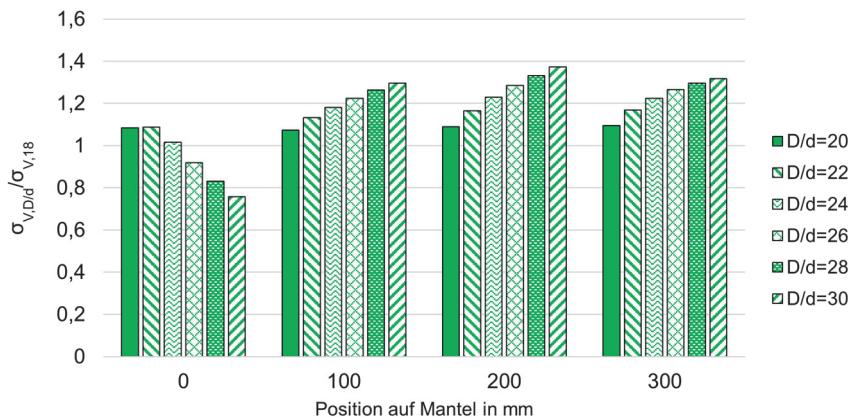


Abbildung 7: Entwicklung der Vergleichsspannungen des Trommelmantels

Zusammenfassung

Diese Parameterstudie beleuchtet den kritischen Einfluss des Trommel-Seildurchmesser-Verhältnisses (D/d) auf die Spannungsverteilung in Seiltrommeln und identifiziert einen fundamentalen Zielkonflikt in deren Auslegung. Es wurde quantifiziert, dass ein größeres D/d-Verhältnis tendenziell zu einer signifikanten Entlastung der Bordscheiben führt, jedoch gleichzeitig eine massive Zunahme der Beanspruchung im mittleren Bereich des Trommelmantels verursacht. Dieser Konflikt, bei dem die Lastaufnahme von den Bordscheiben zum Trommelmantel verlagert wird, stellt Konstrukteure vor die Herausforderung, eine optimale Balance zu finden, um Materialversagen und Ermüdung zu vermeiden.

Zur Bewältigung dieses Zielkonflikts werden verschiedene konstruktive Maßnahmen vorgeschlagen. Eine gezielte Variation der Wanddicken des Mantels oder der

Bordscheiben kann Spannungsspitzen lokal reduzieren. Die Integration von Verstärkungsrippen im Mantelbereich kann die Steifigkeit erhöhen und somit die hohen Tangential- und Axialspannungen im mittleren Bereich des Mantels effektiv mindern. Des Weiteren kann die Art der Torsionseinleitung und die Gestaltung des Seilschlusses optimiert werden, um lokale Kerbwirkungen und Spannungsakkumulationen zu minimieren. Eine ganzheitliche Optimierung unter Berücksichtigung dieser Parameter ist unerlässlich, um die Betriebsfestigkeit und Lebensdauer von Seiltrommeln zu gewährleisten und den identifizierten Zielkonflikt durch angepasste konstruktive Details zu entschärfen.

Literatur

- /1/ Mupende I.: Beanspruchungs- und Verformungsverhalten des Systems Trommelmantel - Bordscheiben bei mehrlagig bewickelten Seiltrommeln unter elastischem und teilplastischem Werkstoffverhalten, Dissertation, Technische Universität Clausthal, Cuvillier Verlag Göttingen, 2001