

## Dimensionierung von Windentrommeln

Henschel, J.

*Die Konstruktion und Dimensionierung von Hebezeugen repräsentiert die Auslegung sicherheitsrelevanter Maschinenelemente. In dem Beitrag werden die Berechnungs- und Gestaltungsgrundlagen eines der Kernelemente der diskontinuierlichen Fördermittel dargestellt. Die Windentrommel stellt in Standard- Hub- und Bergegeräten das zugkräftere Maschinenteil dar. Darüber hinaus wird die Trommel sowohl bei ein- als auch bei mehrlagiger Bewicklung zum Seilspeicher des Zugseiles.*

*The design of winding drums represents the calculation of safety valid machine elements. The following article gives an introduction in the design of lightweight winding drums.*

### 1 Einleitung

Mit dem Ausfall des Trommelkörpers ist ein hohes Sicherheitsrisiko für Mensch und Maschine verbunden. Aufgrund der Tatsache, daß dieses Maschinenelement im Regelfall ohne Redundanz eingesetzt wird, ist eine Dimensionierung nach dem Prinzip des sicheren Bestehens (safe life) oder zumindest des begrenzten Versagens (fail safe) zwingend erforderlich. Demgegenüber steht der Zwang, immer leichtere Konstruktionen zum Einsatz zu bringen. Die durch die Gewichtsreduzierungen gesteigerten spezifischen Beanspruchungen im Bauteil erfordern für eine abgesicherte Auslegung daher die genaue Kenntnis der tatsächlich auftretenden Spannungen.

Die Forderung nach extremem Leichtbau insbesondere in mobilen Förderanlagen führt in vielen Fällen zur Ausnutzung des teilplastischen Verhaltens in Windenkonstruktionen. Diese Überschreitung der „Ingenieur-Grenzwerte“ im Bauteil ist bereits heute, nachgewiesen durch eine Reihe von Messungen am realen Bauteil, in vielen Windenkonstruktionen üblich. In den meisten Fällen sind solche Entwicklungen nicht durch mechanisch korrekte Berechnungsmethoden begleitet, was in der Vergangenheit zu erheblichen Schadensfällen führte.

Die Beanspruchungen im Trommelkörper bilden sich im wesentlichen aus den Umschlingungskräften des Seiles, die durch den Seilzug entstehenden Biegemomente und Querkräfte nehmen eine untergeordnete Bedeutung ein. Die Größe und Verteilung der durch die Bewicklung entstehenden Lasten und der daraus resultierenden Beanspruchungen in der Trommel werden durch das Spannungs-Verformungsverhalten der verwendeten Seile maßgeblich beeinflusst. Die Entwicklung von Seilen der letzten 20 Jahre und deren Optimierung hin zu erheblichen spezifischen Laststeigerungen hat für die Trommel negative Auswirkungen und führt zu Belastungsanteilen, die in der Vergangenheit vernachlässigt werden konnten. So führt die Eigensteifigkeit des Seils zu örtlichen Biege- und Druckmaxima beim Auflauf auf die Trommel. Darüber hinaus wurde, ebenfalls durch Messungen am realen Bauteil bestätigt, ein starker Einfluß auf die Axiallasten, verursacht durch die Bewicklungsgeometrie, festgestellt.

Neben der Dimensionierung des Trommelkörpers stellt die Gestaltung und Berechnung der Bordscheiben bei mehrlagig bewickelten Trommeln einen weiteren Kernpunkt der Konstruktion dar. Insbesondere durch die Verwendung moderner Verseilungsarten und den damit einhergehenden Änderungen der Seilcharakteristika variieren die Bordscheibenlasten in Abhängigkeit vom Bewicklungszustand dramatisch. In den gültigen Berechnungsgrundlagen wird diese Tatsache nur eingeschränkt berücksichtigt.

Mit dem vorgestellten Systemansatz wird die Abhängigkeit der Trommellasten von den Seilcharakteristika dargestellt. Nur durch die Kombination eines im Verhalten beschreibbaren Seiles und einer geometrisch optimierten Windentrommel ist die Forderung nach extremem Leichtbau erreichbar. Die drei Kernpunkte der Dimensionierung stellen die Analyse der Drahtseileigenschaften, die Berechnung des Trommelkörpers als rotationssymmetrische Kreiszyinderschale und die Dimensionierung der Bordscheiben dar.

In diesen drei Kernpunkten bleibt die Beschreibung im linerarelastischen Bereich des Werkstoffverhal-

tens der Trommelwerkstoffe. Das nichtlineare Steifigkeitsverhalten der Seile wird durch ein Iterationsverfahren berücksichtigt. Hierdurch und durch die Anwendung moderner mathematischer und numerischer Verfahren ist eine gegenüber /1/ genauere Erfassung des Gesamtsystems Seil/Bewicklung/Trommel möglich.

Dem Anspruch, ein Hilfsmittel für den in der Konstruktion tätigen Ingenieur bereitzustellen, wird durch die Aufbereitung der Resultate in Form von Formelsammlungen, Tabellen und Berechnungsprogrammen genügt.

## 2 Stand der Technik

Bereits um 1900 /2/ greifen erste Veröffentlichungen die Probleme bei der Dimensionierung von Windentrommeln auf. Insbesondere /3/, /4/ und /5/ sowie /6/ und /7/ befassen sich eingehend mit der Berechnung von Trommelkörpern.

Mit /8/, /9/ und /10/ werden moderne Ansätze erarbeitet, welche auf der Grundlage der biegesteifen Kreiszyinderschale beruhen. Mit /1/, ergänzt durch /11/, wurden geschlossene Lösungen erarbeitet, welche bis heute Gültigkeit besitzen.

Durch /12/, /13/ und /14/ wurden Ergänzungen erarbeitet, welche für Teilbereiche detailliertere Lösungen liefern.

Das Maschinenelement Windentrommel wird im Regelfall zur Dimensionierung in die Grundkörper:

- Trommelmantel (rotationssymmetrische Schale)
- Bordscheiben (rotationssymmetrische Scheiben oder Platten)

zerlegt. Zusätzliche Trommelelemente, z.B. Bremsstrommeln oder Stützscheiben, Kupplungs- oder Zahnradanbindungen werden in mechanische Grundkörper, Schalen-, Platten-, oder Scheibenelemente zerlegt und in die Berechnungen mit einbezogen. Alle Veröffentlichungen nehmen ausschließlich rotationssymmetrische Geometrien und Belastungen auf, die Auswirkungen von radialen Stützrippen oder ortsbegrenzten geometrischen Besonderheiten, wie Seilschloß und Auflaufkeile werden nicht berücksichtigt.

Die Berechnung der Beanspruchungen erfolgt bei geschnittenem System unter Übertragung der Rand- bzw. Zwischenbedingungen. Die charakteri-

stischen Eigenschaften zur Dimensionierung des Trommelmantels werden im Regelfall aus dessen geometrischen Abmessungen abgeleitet.

Die Dimensionierung der Bordscheiben, welche ein Ablaufen des Seiles bei mehrlagiger Bewicklung verhindern sollen, erfolgt im Regelfall unter Zugrundelegung der einschlägigen Scheiben- bzw. Schalentheorie.

Die vergleichende Betrachtung der in der Literatur dokumentierten Lastannahmen zeigt, daß die Varianz der resultierenden Bauteilwandstärken bei konstanten Stranglasten groß ist. Diese Tatsache läßt den Rückschluß zu, daß die vorhandenen Berechnungs- und Lastannahmen mit vergleichsweise hohen Unsicherheiten behaftet sind.

## 3 Das Verhalten der Drahtseile

Der Literatur sind eine Reihe von Untersuchungen zu entnehmen, welche sich mit der analytischen und empirischen Beschreibung des Elastizitätsverhaltens von Drahtseilen auseinandersetzen. Die Basis nahezu aller Untersuchungen ist die Analyse der Geometrie sowie des Längselastizitätsverhaltens und der Querkontraktion des Drahtseiles unter Zuglast.

Für die Berechnung der durch die Bewicklung mit einem Drahtseil hervorgerufenen Beanspruchungen in einer Windentrommel ist darüber hinaus die Kenntnis des Querelastizitätsverhaltens von entscheidender Bedeutung. Wie durch die Untersuchungen von /1/ nachgewiesen, besteht ein unmittelbarer Zusammenhang zwischen dem Verhältnis der Verformungsfähigkeit des Drahtseiles längs und quer zur Zugrichtung und den resultierenden Beanspruchungen im Trommelmantel.

Die praktische Bedeutung der Kenntnis des Längselastizitätsverhaltens wird in einer Reihe von Anwendungen deutlich. Beispielhaft seien die im Betrieb von Hebezeugen auftretenden Längsschwingungserscheinungen der Förderseile genannt, welche bei der Dimensionierung zu berücksichtigen sind. Die Bemessung von Drahtseilen für Seilbahnen erfordert die genaue Kenntnis der sich unter Last einstellenden resultierenden Längen, um einen gefahrlosen Betrieb zu gewährleisten.

Die meßtechnische Ermittlung des Längselastizitätsverhaltens von Drahtseilen gehört zu den vom Hersteller gelieferten Standardinformationen. Zur analytischen Beschreibung des Verhaltens in

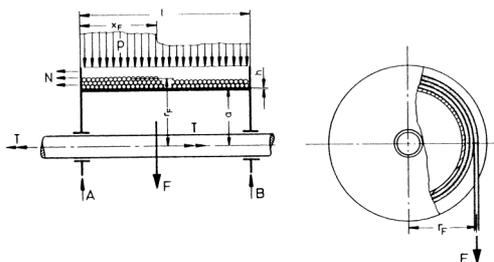
Längsrichtung wird auf die einschlägige Literatur verwiesen.

Die Quantifizierung des Längs- und Querelastizitätsmoduls, als ein auf den Seilabschnitt bezogener Wert des Elastizitätsverhaltens von Drahtseilen, ist in bezug auf die Dimensionierung von Windentrommeln unumgänglich. Das Last- Verformungsverhalten sowohl in Längs- wie in Querrichtung bestimmt die Trommelbelastungen entscheidend. Die hierzu entwickelten Berechnungsansätze erfordern die experimentelle Ermittlung der charakteristischen Parameter.

Im Rahmen der Untersuchungen wurde eine Vielzahl von unterschiedlichsten Seilmacharten meßtechnisch untersucht.

#### 4 Beanspruchungen und Verformungen

**Bild 1** zeigt die am Trommelkörper angreifenden äußeren Lasten. Die Modellbildung zur Berechnung basiert im wesentlichen auf /1/ und /11/ und führt zur Berechnung der Windentrommel als biegesteife Kreiszylinderschale. Die Darstellung der Grundzüge der Abstraktion auf eine biegesteife Kreiszylinderschale dient der Verdeutlichung der zur Berechnung notwendigen Vereinfachungen. Es wird somit möglich, die hierdurch implizierten Schwachpunkte der bisherigen Berechnungsmodelle aufzuzeigen und zu diskutieren.



**Bild 1:** Beanspruchungen an einer Windentrommel /1/

#### 5 Modellbildung und Berechnungsansatz

Im folgenden wird die Umsetzung der theoretischen Grundlagen in ein Dimensionierungswerkzeug für Windentrommeln zusammenfassend dargestellt. Die Berücksichtigung der Einschränkungen der Abstrahierung und die Gewichtung dieser im Hinblick auf die Ergebnsgüte, werden bei der Beschreibung der Ansätze aufgegriffen.

#### 5.1 Die biegesteife Kreiszylinderschale

Unter Bezug auf **Bild 1** gilt für die äußeren Lastkomponenten für den allgemeinen Fall:

$$p_r = f_{(x)}; \quad p_x = f_{(x)}; \quad p_{(\phi)} = 0; \quad 0 \leq x \leq l$$

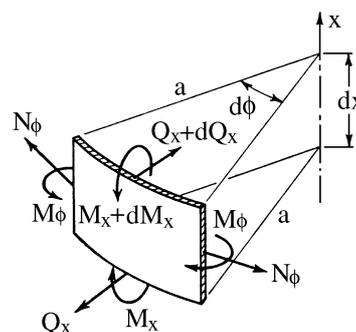
Wobei im Fall der Windentrommel ein windungsweiser konstanter Trommeldruck zugrunde gelegt wird. Aufgrund der Drehsymmetrie werden die folgenden Schnittkräfte und Momente zu Null:

$$N_{x\phi} = N_{\phi x} = 0$$

$$M_{x\phi} = M_{\phi x} = 0$$

$$Q_\phi = 0$$

Es ergeben sich die in **Bild 2** gezeigten Verhältnisse am infinitesimalen Schalelement.



**Bild 2:** Schnittgrößen am Schalelement

Die resultierenden Gleichgewichtsbedingungen in radialer Richtung sowie das Momentengleichgewicht an der Mittelflächentangente ergeben sich zu:

$$N_\phi d\Phi dx + dq_x a d\Phi - p_{r(x)} d\Phi dx = 0$$

$$Q_x dx d\Phi - dM_x a d\Phi = 0$$

Durch Substitution des Momentengleichgewichts erhält man:

$$\frac{d^2 M_x}{dx^2} + \frac{1}{a} N_\phi = p_{r(x)}$$

Durch die Drehsymmetrie zu x wird die Verschiebungskomponente v in Richtung der Mittelflächentangente zu Null. Hieraus folgt:

$$\varepsilon_{\Phi} = \frac{w}{a} \quad \text{und für } N_x = 0 \text{ folgt } \varepsilon_{\Phi} = \frac{N_{\Phi}}{Et}$$

$$\text{bzw. } N_{\Phi} = Et \frac{w}{a}$$

Die hierbei getroffene Vereinbarung  $N_x=0$  ist durch die eingangs erwähnte Trennung der Beanspruchungen in den verschiedenen Ebenen erlaubt. Die spätere Überlagerung der tangentialen und axialen Lastanteile ist durch die rein elastische Berechnung zu rechtfertigen. Des weiteren gilt unter Berücksichtigung der Krümmung  $\kappa_x$  mit der Biegesteifigkeit  $K$ :

$$M_x = -K\kappa_x = K \frac{d^2 w}{dx^2}$$

Interpretiert mit dem Momentengleichgewicht an der Mittelflächentangente resultiert:

$$Q_x = K \frac{d^3 w}{dx^3}$$

Die Differentialgleichung zur Berechnung der rotationsymmetrischen Kreiszylinderschale unter stückweise konstantem Druck ergibt sich zu:

$$\frac{d^4 w}{dx^4} + \frac{12(1-\nu^2)}{a^2 t^2} w = \frac{12(1-\nu^2)}{Et^3} p_{r(x)}$$

Hierbei ist zu bemerken, daß der Druck  $p_{r(x)}$  im folgenden für jede Seilwindung konstant angenommen wird. Die Berechnung der bei mehrlagiger Bewicklung entstehenden Drücke ist der Darstellung in Kapitel 5.3 zu entnehmen.

## 1.2 Das Grundmodell

Zur Bestimmung der Lastfunktion bei der Berechnung von Windentrommeln können folgende Annahmen getroffen werden:

Die Belastung  $p_x(x)$  beeinflusst im wesentlichen die Schnittgröße  $N_x$ . Aufgrund der getroffenen geometrischen Vereinbarungen ist deren Auswirkung auf die Biegelinie der Trommel unbedeutend. Aus die-

sem Grund wird für die Berechnung der Biegeschale angenommen:

$$P_x(x) = 0$$

Eine spätere Superposition der aus den Belastungen entstehenden Beanspruchungen ist aber notwendig, da die Anteile der Axialbelastung, z.B. aus dem „Zug“ der Bordscheiben oder dem Einfluß der Trommelrillung, erheblich sein können.

Die Belastung  $p_r(x)$  stellt im wesentlichen den Umschnürungsdruck des Seiles dar, der von der Seillast, dem elastischen Zusammenspiel von Seil und Trommel und dem Verformungsverhalten des „Seilpakets“ bei mehrlagig bewickelten Trommeln abhängig ist und daher von Lastfall zu Lastfall stark schwanken kann.

Zur Berücksichtigung und Erfassung dieser Belastung wird ein mechanisches Modell gewählt das davon ausgeht, daß der Umschnürungsdruck mindestens einer Windung konstant ist und das die (an sich schraubenförmigen Windungen) durch eine Anzahl kreisförmiger Umschnürungen ersetzt werden. Die Größe dieser – annähernd konstanten - Flächenpressung  $p_r(x)$  ist das Ergebnis der Berechnung eines hochgradig unbestimmten Systems, welches das Last-Verformungs Verhalten der Trommel unter einer Windung als Basis hat.

Daher wird zunächst eine Schale der Länge  $l$  betrachtet, welche durch eine einzige Windung der Breite  $s$  belastet wird. Dieses belastete Schalenteil wird von zwei unbelasteten und am Rand befestigten Schalen der Längen  $l_1$  und  $l_2$  berandet. Die belastete Schale erfährt einen konstanten Druck  $p$ , die Randschalen den (ebenfalls konstanten) Druck  $p=0$ . Die Beschreibung des Verhaltens der drei Schalen ist nun mit der Differentialgleichung der biegesteifen Kreiszylinderschale möglich. Diese ist mit Hilfe der Randbedingungen für jede der drei Schalen lösbar.

## 1.3 Entlastungseffekte

Im folgenden wird ein Ansatz zur Beschreibung des Elastizitätsverhaltens von Drahtseilen, welche auf einen Trommelkörper gewickelt sind, beschrieben. Die Lasteinleitung in den Trommelkörper wird hier von nach /4/, /1/ und /11/ entscheidend beeinflusst.

Folgende Annahmen werden zugrunde gelegt:

Die schraubenförmige Wicklung wird in eine Aneinanderreihung kreisförmiger, geschlossener Ringe zerlegt.

Für den kreisförmigen Seilquerschnitt wird ein quadratischer Ersatzquerschnitt angenommen. Die Fläche des Ersatzquerschnitts ist gleich der Fläche des Seilquerschnitts. Es gilt:

$$s = \frac{d}{2} \sqrt{\pi}$$

Auf die Trommel wirkt dann unter dem Seil ein über die Fläche des Ersatzquerschnitts konstanter Druck.

Die Dehnung der Seilringe wird nach der Formel für kreiszylindrische Ringe berechnet. Die Ringstärke wird hierbei als klein gegenüber dem Radius der Ringe angenommen. Es gilt:

$$\sigma_s = \frac{F_s}{s^2}$$

Damit ergibt sich eine Druckspannung auf die Seiltrommel von:

$$p = \sigma_s \frac{s}{a+t} = \frac{F_s}{\frac{a+t}{2}}$$

Für die einlagig bewickelte Seiltrommel folgt nun aus den genannten Bedingungen die Beschreibung der Entlastungseffekte.

Zu der Berechnung der mehrlagig bewickelten Seiltrommel werden die Windungen verschiedener Lagen als sich berührende, konzentrische Ringe betrachtet.

Neben der gegenseitigen Entlastung der Windungen einer Lage tritt bei der mehrlagig bewickelten Seiltrommel noch ein weiterer Entlastungseffekt auf. Durch den Druck einer Seillage auf die unter ihr liegenden Lagen werden diese zusammengequetscht. Die damit verbundene Reduzierung des Windungsradius führt zu einer Entlastung in Seillängsrichtung und damit zu einem reduzierten Trommeldruck. Dieser Entlastungseffekt wird primär von dem Elastizitätsverhalten des Seiles quer zur Lastrichtung bestimmt. Als beschreibender Pa-

rameter wird hierzu das Seilquerschnittsmodul  $E_{sq}$  verwendet.

Um die Drücke  $X_{i,m}$ ,  $i=1, \dots, m-1$ ,  $j=1, \dots, n$ , zwischen den einzelnen Lagen an der Stelle der  $j$ -ten Windung, insbesondere den resultierenden Druck  $X_{1,m}$  auf den Trommelkörper zu bestimmen, wird folgendermaßen vorgegangen.

Für jede Windung  $j$  werden alle unbekannt Drücke  $X_{1,m}$  bis  $X_{m-1,m}$  berechnet.

Der Radius  $r_i$  einer Windung in der  $i$ -ten Lage:

$$r_i = a + \frac{t}{2} + (i-1)s + \frac{s}{2}, \quad i = 1, \dots, m-1$$

Die Absenkung  $c_i$  einer Seilwindung vom Radius  $r_i$  unter dem Druck 1:

$$c_i = -\frac{r_i^2}{E_s s}, \quad i = 1, \dots, m-1$$

Die Zusammenpressung des Seilquerschnitts unter dem Druck 1:

$$c_Q = \frac{s}{E_{sQ}}$$

Der Druckminderungsfaktor  $f_i$  einer Seilwindung in der  $i$ -ten Lage auf ihre Unterlage, infolge des Zusammenquetschens des Seilquerschnitts unter dem Druck 1:

$$f_i = \frac{s^2}{2r_i^2} \frac{E_s}{E_{sQ}}, \quad i = 1, \dots, m-1$$

Die Druckminderung des Druckes der  $i$ -ten auf die  $(i-1)$ -te Lage wird dann:

$$\Delta X_{ij} = -f_i X_{ij}, \quad i = 2, \dots, m$$

Die  $m$ -te Lage wird unter dem Druck  $p$  aufgewickelt, d.h. sie drückt mit  $X_{m,m} = p$  auf die  $(m-1)$ -te Lage.

Ferner sei  $c_{Tj}$ ,  $j=1, \dots, n$ , die Absenkung der Trommel an der Stelle der  $j$ -ten Windung unter dem Druck 1,

bei Berücksichtigung der gegenseitigen Entlastung der einzelnen Windungen.

Die 2m-2 Absenkungen an der Stelle der Windung j, können wie folgt beschrieben werden:

$$w_T = X_{1,m} c_{Tj}$$

$$w_{1,m} = X_{1,m} c_1 - X_{2,m} c_1 + \frac{1}{2} X_{1,m} c_Q$$

$$w_{1,m}^* = X_{1,m} c_1 - X_{2,m} c_1 + \frac{1}{2} X_{2,m} c_Q$$

⋮

$$w_{i,m} = X_{i,m} c_i - X_{i-1,m} c_i + \frac{1}{2} X_{i,m} c_Q$$

$$w_{i,m}^* = X_{i,m} c_i - X_{i-1,m} c_i + \frac{1}{2} X_{i-1,m} c_Q$$

⋮

$$w_{m-1,m} = X_{m-1,m} c_{m-1} - X_{m,m} c_{m-1} + \frac{1}{2} X_{m-1,m} c_Q$$

Unter Verwendung der Verträglichkeitsbedingungen,

$$w_T = w_{1,m}; \quad w_{i,m}^* = w_{i+1,m}, \quad i = 1, \dots, m-2;$$

folgt ein lineares Gleichungssystem für die m-1 Unbekannten  $X_{i,m}$ :

$$e_1 + c_1 X_{2,k} = 0$$

$$c_1 X_{1,k} - e_2 X_{2,k} + c_2 X_{3,k} = 0$$

$$c_2 X_{2,k} - e_3 X_{3,k} + c_3 X_{4,k} = 0$$

⋮

$$c_i X_{i,k} - e_{i+1} X_{i+1,k} + c_{i+1} X_{i+2,k} = 0$$

⋮

$$c_{k-2} X_{k-2,k} - e_{k-1} X_{k-1,k} = -c_{k-1} X_{k,k}$$

mit

$$e_i = \begin{cases} c_T - (1 + f_1) c_1 & \text{für } i = 1, \\ -[(1 + f_{i-1}) c_{i-1} + (1 + f_i) c_i] & \text{sonst} \end{cases}$$

Dieses Gleichungssystem wird nun sukzessive für k=1 bis zur tatsächlichen Lagenzahl m gelöst. Der

Druck  $p_{Tj}$ , welcher an der Stelle der j-ten Windung auf die Trommel wirkt, wird berechnet als Summe der Drücke  $X_{i,k}$ :

$$p_{Tj} = \sum_{k=1}^m X_{1,k}$$

Sind alle j Drücke  $p_{Tj}$  bestimmt, so werden – analog zur Berechnung einer mit n Windungen einlagig bewickelten Trommel – n Matrizen  $V_j$  einer mit konstantem Druck  $p_{Tj}$  belasteten Schale der Länge d berechnet. Die Superposition der Resultate führt zu der mit Entlastungseffekt berechneten Druckbeanspruchung der mehrlagig bewickelten Trommel.

Diese von /1/ erstmals in Form einer Dimensionierungssoftware aufgearbeitete Theorie des Entlastungseffekts einer Bewicklung, verwendet ein im gesamten Wicklungspaket konstanten Seilquerelastizitätsmodul. Die Versuche an Drahtseilen zur Ermittlung der elastischen Kennwerte weisen jedoch eine Abhängigkeit des Querelastizitätsmoduls sowohl von der Lagenzahl als auch von der Stranglast nach.

Die lagenweise Anpassung des Seilquerelastizitätsmoduls in Abhängigkeit der durch den Entlastungseffekt hervorgerufenen Lagendruckreduzierung erscheint somit geboten. In der Realisierung bedeutet dies eine iterative Neuberechnung des Lagendruckes bis zu einer hinreichend genauen Konvergenz gemäß der oben beschriebenen Modellbildung. Die Umsetzung im Rahmen der Überarbeitung der Dimensionierungssoftware STB führte unter Berücksichtigung einer lagenweisen Anpassung des Querelastizitätsmoduls zu einer Reduzierung des Trommeldrucks von 8% bis 12% in Abhängigkeit der Seilcharakteristika.

Das bereits von /1/ dargestellte Verfahren der Entkopplung von Wicklungspaket und Trommelkörper findet in der Berechnung, in modifizierter Form, Anwendung.

/1/ beschreibt die Lastfunktion auf den Trommelkörper durch die Abstraktion auf Windungssäulen mit konstantem Elastizitätsverhalten der Seile. Die Bestimmung dieser „säulenweisen“ Bestimmung des Trommeldrucks impliziert jedoch durch die Tatsache des konstanten Querelastizitätsmoduls der Seile eine Verfälschung der realen Trommellasten. In der vorliegenden Arbeit wird daher eine Windungssäule mit veränderlichem Seilquerelastizi-

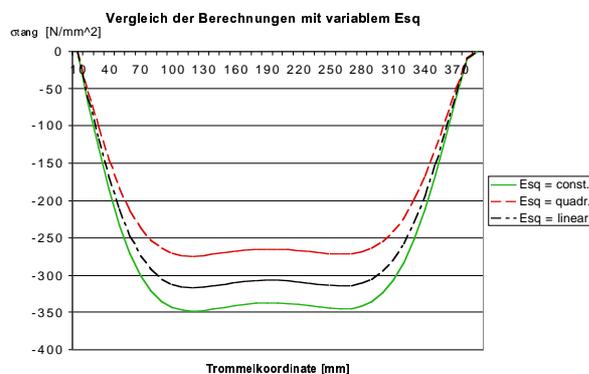
tätsmodul und damit angepaßtem Trommeldruck modelliert. Grundlage dieser Überlegung ist die Tatsache, daß bei der Mehrlagenwicklung die Seile der unteren Lagen durch die Mehrlagigkeit höher belastet sind als die Teile der oberen Lagen. Demzufolge ändert sich auch unter der Annahme einer konstanten Seillängsspannung das Elastizitätsverhalten der Seile lagenweise.

Der berechnete, korrigierte Trommeldruck, wirkt auf ein Schalenelement, welches entsprechend dem aufgelegten Seildurchmesser  $d$  gewählt wird. Die Aneinanderreihung einer der Anzahl der aufgelegten Windungen entsprechenden Anzahl von Schalenstücken dieser Art ermöglicht mit der Kenntnis der Rand- und Zwischenbedingungen der Einzelschale eine „Zusammensetzung“ des realen Trommelmantels.

Die Abhängigkeiten zwischen den Windungssäulen und deren Auswirkung auf die Beanspruchungen im Trommelkörper werden durch die Aufbringung einer Einheitsverschiebung modelliert. Es ist somit möglich, die „elastische Antwort“ des Trommelkörpers auf die Bewicklung im Grundverhalten darzustellen. Die Berechnung der o.g. Trommeldrücke und deren Einarbeitung in Form von Einflußzahlen transformiert das abstrakte Grundsystem zur Darstellung des realen Trommelkörpers mit absoluten Beanspruchungen.

Die Kopplung der genannten Einzelschalen mit den darüber stehenden Windungssäulen erfolgt durch das Übertragungsmatrixverfahren.

Die vorgestellten Methoden sind in der Dimensionierungssoftware TRODIM implementiert. Die vergleichende Betrachtung der so errechneten Verformungslinien des Trommelkörpers ist in **Bild 3** dargestellt.



**Bild 3:** vergleichende Betrachtung

## 6 Zusammenfassung

Zur Berechnung von Windentrommeln bedarf es eines Systemansatzes, welcher das elastische Verhalten des Seiles einerseits und das elastische Verhalten des Trommelkörpers andererseits erfaßt. Dieser, auf der analytischen Beschreibung des elastischen Verhaltens des Bewicklungspakets basierende Ansatz, ermöglicht die Berechnung der Trommellasten bei der Verwendung von handelsüblichen Seilen. Neben den üblicherweise verwendeten Drahtseilen können auch die deutlich differierenden Beanspruchungen bei der Bewicklung mit Kunststoffseilen berechnet werden. Im Gegensatz zu bisherigen Berechnungsansätzen ermöglicht die im Rahmen der Arbeit entwickelte Dimensionierungssoftware TRODIM die Berücksichtigung eines lagenweise variierenden Seilquerschnitts.

Die Quantifizierung der durch die Bewicklung hervorgerufenen Beanspruchungen im Trommelmantel wird durch die Modellierung des Trommelkörpers als biegesteife Kreiszyinderschale ermöglicht. Das von /1/ erstmals bei der Berechnung von Trommeln eingeführte Verfahren der Übertragungsmatrizen wird in der vorliegenden Arbeit modifiziert wieder aufgegriffen.

Zur Berechnung der Bordscheibenwandstärke von Trommelwinden wurde eine neue Theorie entwickelt. Diese auf der Kräfteinleitung als Flächenlast basierende Modellbildung ermöglicht die Berücksichtigung des Querkontraktionsverhaltens von Seilen. Durch Versuche am realen Bauteil konnte nachgewiesen werden, daß die Querkontraktionszahl der Seile entscheidenden Einfluß auf die Beanspruchungen in den Bordscheiben haben.

Umfangreiche Versuchsreihen dienen zur Bestätigung der gewonnenen Erkenntnisse.

Eine große Anzahl von Seilen wurde auf einem Spezialprüfstand zur Messung des Querelastizitätsverhaltens von einzelnen und geschichteten Drahtseilen durchgeführt. Die Versuche dienen der Ermittlung des Querelastizitätsmoduls und der Querkontraktionszahl von Seilen, welche in die Berechnungsmodelle Eingang finden.

Messungen am realen Trommelkörper mittels Dehnungsmeßstreifen dienen der Bestätigung der Lastannahmen und der daraus resultierenden Beanspruchungen im Trommelkörper.

Auf der Basis der Berechnungsergebnisse der analytischen Lösungsansätze und der Versuche am Bauteil wurde eine Optimierung mit der Methode der finiten Elemente durchgeführt. Die erreichte

Gewichtsreduzierung des Trommelkörpers beträgt 20 %.

Die Anwendung der vorgestellten Ansätze und Berechnungsmethoden ermöglicht die Konstruktion von Leichtbauwindentrommeln.

Seil und Trommel"; Fördern und Heben, 19/6, 1969, 349-352.

/14/ P. Bolvansky: "Beitrag zur Berechnung der Spannungen in der Seiltrommelwand"; Deutsche Hebe- und Fördertechnik, 3/11, 1985, 27-28.

## 7 Literatur

- /1/ Dietz, P.: Ein Verfahren zur Berechnung ein- und mehrlagig bewickelter Seiltrommeln. Dissertation, TH Darmstadt, 1971
- /2/ R. Lorenz: "Die Berechnung rotierender Trommeln"; Zeitschrift des Vereins Deutscher Ingenieure, 54/34, 1910, 1397-1403.
- /3/ E. O. Waters: "Rational Design of Hoisting Drums"; The American Society of Mechanical Engineers, Transactions, 42/1760, 1920, 463-485.
- /4/ H. Ernst: "Untersuchungen über die Beanspruchung der Seiltrommel von Kranen und Winden"; Mitteilungen aus den Forschungsanstalten Gutehoffnungshütte, 6/8, 1938, 195-215.
- /5/ N. Sag und A. C. Briggs: "Charts Simplify Hoisting Drum Design"; Machine Design, 25/4, 1953, 265-271.
- /6/ T. Egawa und M. Taneda: "External Pressure Produced by Multi-Layers of Rope Wound about a Hoisting Drum"; Bulletin of JSME, 1, 1958, 386.
- /7/ J. Dolan: "Winder Drum Tread Design Investigation"; The South African Mechanical Engineer, 13/12, 1963, 97-138.
- /8/ C. B. Biezeno, Grammel, R.: "Technische Dynamik"; Springer Verlag, Berlin, 1953.
- /9/ M. Eßlinger: "Berechnung einer Seiltrommel"; Der Stahlbau, 23/7, 1954, 150-157.
- /10/ H. Kraitschy: "Beitrag zur Berechnung und Konstruktion von mehrlagig bewickelten Seiltrommeln"; Schweißtechnik, 24/7, 1974, 315-318.
- /11/ H. J. Neugebauer: "Berechnungsverfahren für ein- und mehrlagig bewickelte Seiltrommeln"; Dissertation, Technische Universität Dresden, 1977.
- /12/ N. W. Bellamy und B. D. A. Phillips: "An investigation into flange forces in winch drums"; The Institution of Mechanical Engineers, Proceedings, 183/1, 1968, 579-590.
- /13/ G. Hoeland: "Ein Beitrag zur Berechnung von Seiltrommeln unter Berücksichtigung der Verformungen und der Reibung zwischen