

# Mit Dietz vom Albertschen Drahtseil zur Leichtbautrommel



Dietz, P.; Henschel, J.; Mupende, I.; Otto, St.; Stahr, K.

*Der Tod von Prof. Dr.h.c. Dr.-Ing. Peter Dietz ist Anlass, um einen Teilbereich seiner Forschungstätigkeit - die Konstruktion und Dimensionierung von Seiltrommeln - vorzustellen. Der kurze geschichtliche Rückblick spannt den Bogen von den Anfängen der Drahtseilverwendung, die eng mit der Stadt Clausthal, deren Bürgermeister er in den letzten Jahren war, verbunden ist, zu den Forschungsprojekten auf dem Gebiet der Dimensionierung von Leichtbauwindentrommeln, die unter Leitung von Prof. Dietz am Institut für Maschinenwesen der TU Clausthal bearbeitet wurden und nun unter seinem Nachfolger Prof. Armin Lohrengel weiter vorangetrieben werden.*

*Considering the fatal accident of Prof. Dr.h.c. Dr.-Ing. Peter Dietz in April 2010 this article describes one part of his research work - the design and calculation of hoisting drums. The short historic review starts with the first application of ropes, which are closely connected to the town of Clausthal and finishes with state of the art research projects in the field of designing light-weight hoisting drums. This work is carried out under the supervision of Prof. Dietz and his follower Prof. Lohrengel at the Institute of Mechanical Engineering of Clausthal University.*

## 1 Historisches über Drahtseil und Seiltrommel

### 1.1 Drahtseile der Frühzeit

Mit dem Drahtseil hielt im vergangenen Jahrtausend ein Maschinenelement Einzug in die industrielle Anwendung, das insbesondere der Fördertechnik zu einem ungeahnten Aufschwung verhalf. Erstmals war es möglich geworden, aufgrund des geringen Platzbedarfs, der großen Biegsamkeit und gleichzeitig hohen Festigkeit der Drahtseile schwere Lasten auf geringem Raum zu heben bzw. hohe Zugkräfte einfach umzulenken.

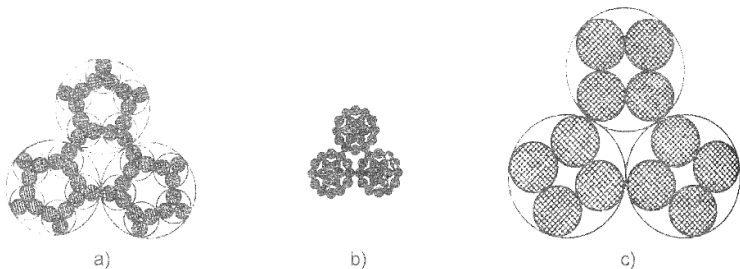
Drahtseile sind jedoch keine Erfindung des 19. Jahrhunderts. Es ist bekannt, dass schon die alten Römer aus Drähten geflochtene Stränge

zum Heben von Lasten verwendeten, wie ein um 79 n. Ch. in Pompeji gefundenes 4,5 m langes Seil aus 15 Bronzedrähten belegt. Auch in China sollen schon vor 1500 Jahren Drahtseile für den Bau von Hängebrücken verwendet worden sein /2/.

Obwohl aus der Zeit des Mittelalters keine Berichte über den Einsatz von Drahtseilen vorliegen, ist mit Sicherheit anzunehmen, dass auch in dieser Epoche vereinzelt Drahtseile für Förderzwecke - z.B. zur Bewegung von Erdmassen - verwendet wurden. So wird beispielsweise berichtet, dass beim Bau der Danziger Festungswerke um 1644 Drahtseile zum Einsatz kamen.

## 1.2 Das Albertsche Drahtseil

Ein wichtiger Wirtschaftszweig des ausgehenden 19. Jahrhunderts war der Bergbau. Als Zugmittel für die Schachtförderung dienten damals hauptsächlich Hanf- oder Aloeseile. Nur vereinzelt - 1818 in Westfalen und 1831 im Freiburger Bergbau - wurden Drahtseile im Grubenbetrieb eingesetzt. Ohne Kenntnis dieser früheren Drahtseilbenutzungen ließ Oberbergrat W. Julius Albert 1834 im Schacht der Clausthaler Grube Caroline die bis dahin zur Erzförderung verwendeten Hanf- oder Aloeseile durch ein nach seinen Angaben hergestelltes Drahtseil ersetzen. Das Konstruktionsprinzip des Drahtseils, der schraubenlinienförmige Aufbau aus Litzen und Drähten, ist unbestritten sein Verdienst und bis heute aktuell. Diese ersten Drahtseile waren Rundlitzenseile, die aus 3 Litzen zu je 4 Drähten von 3,5 mm Durchmesser bestanden (**Bild 2c**). Sie besaßen noch keine der inneren Schmierung des Drahtseils dienende Faserstoffeinlage.



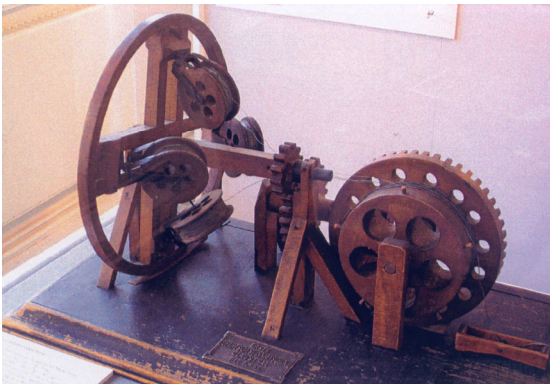
**Bild 2:** Ältere Seile und Albertsches Seil; a) Kabelschlag, Halsbrücke 1831; b) Kreuzschlag, Pompeji 79 n. Ch.; c) Gleichschlag, Clausthal 1834/1

Neben dem von ihm entwickelten Konstruktionsprinzip führte Albert auch den ersten Versuch einer kontrollierten Drahtseilherstellung durch. Dabei ist bemerkenswert, dass die von ihm geschlagenen Seile einen bis heute nicht erreichten Verseilungsfaktor von nahezu 100% aufwiesen. Mit dieser Art der Seilherstellung erreichte Albert trotz mangelhafter Zuverlässigkeit der damals vorhandenen Drahtwerkstoffe den gleichen Sicherheitsmechanismus heutiger Seile, die "Litze für Litze" reißen. Dies zeugt von dem Weitblick Alberts bei dem Bemühen, die Zuverlässigkeit in der Schachtförderung zu erhöhen. Die vom Oberbergrat W. J. Albert hergestellten Drahtseile waren Gleichschlagseile, das heißt die Drähte in den Litzen waren im gleichen Richtungssinn geschlagen wie die Litzen im Seil (**Bild 3**). Aus diesem Grund konnte man die Bezeichnung „Gleichschlag“ lange unter dem Begriff „Albertschlag“.



**Bild 3:** Gleichschlagseil, linksgängig /2/

Trotz vieler Widrigkeiten, die vor allem mit der Drahtherstellung und der manuellen Verseilung zusammenhingen (so waren 1836 für das Flechten eines Seils 13 Mann erforderlich /13/), verbreitete sich die Anwendung des Drahtseils im Laufe kürzester Zeit in Europa und Amerika. Die Einführung der ersten Verseilmachine von Wurm (**Bild 4**) in Wien forcierte diesen Prozess.



**Bild 4:** Wurtsche Verseilmachine; 1837

Mit der Verwendung der Drahtseile erhöhten sich zwangsläufig auch die Belastungen auf die Seiltrommeln. Dies liegt hauptsächlich darin begründet, dass Drahtseile steifer als Hanf- oder Aloeseile und die realisierbaren Zuglasten weit größer sind. Allerdings sollten nach der industriellen Einführung der Drahtseile nahezu 100 Jahre vergehen, bis die ersten wissenschaftlichen Betrachtungen auf dem Gebiet der Seiltrommeldimensionierung durchgeführt wurden.

### **1.3 Aus den Anfängen der Seiltrommelforschung**

Die Bemessung und Gestaltung von Seiltrommeln basierte zunächst ausschließlich auf dem Erfahrungsschatz und den Forschungsarbeiten der Trommelhersteller. Darüber hinaus existierten zu Beginn des 20. Jahrhunderts nur wenige Veröffentlichungen, die zudem die Problematik der Konstruktion von Seiltrommeln nur spärlich behandelten, vorsichtige Vermutungen äußerten oder lediglich in der Praxis akzeptierte Verfahrensweisen aufzeigten. Die Berechnung der Beanspruchungen beschränkte sich auf den Bereich des Trommelgrundkörpers, der vereinfacht als Kreiszyylinder unter äußerem Druck (verursacht durch die Seilwindungen) abgebildet und mit Hilfe der Kesselformel dimensioniert wurde.

Eine der ersten Arbeiten, die sich gezielt mit der beanspruchungsgerechten Auslegung von Seiltrommeln befasste, wurde 1920 von Waters veröffentlicht /5/. Er unterscheidet zwischen den Beanspruchungen des Trommelgrundkörpers und denen der Bordscheiben. Es folgten Arbeiten von Kleinn /6/, der als erster die Theorie „Kreiszyylinder unter Außendruck“ überprüfte, und John /7/, der die äußere Druckbeanspruchung als Stabilitätsproblem auffasste.

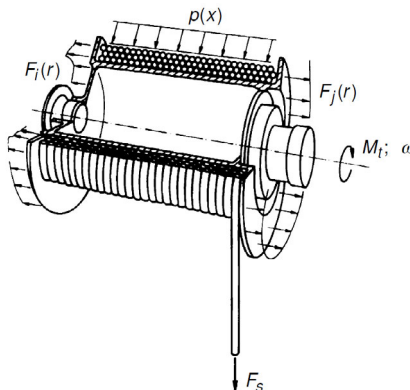
Eine umfangreiche Betrachtung über die Belastung von Seiltrommeln wurde 1938 von Ernst veröffentlicht /8/. Seine Auslegungsvorschriften basierten auf der Biegetheorie der Kreiszyinderschale und waren aufgrund des erheblichen Aufwandes nur für einige spezielle Lastfälle anwendbar. Auch die Arbeiten von Biezeno-Grammel /9/, Eßlinger /10/, Woywode /11/ und Hoeland /12/ setzten die Abbildung des Trommelkörpers als Kreiszyinderschale voraus. Die Schwerpunkte der Untersuchungen lagen hier jedoch auf der Berechnung der Bordscheiben, des Spulungsverhaltens der Seile sowie der mathematischen Beschreibung unterschiedlicher statischer Lastfälle. Alle diese Berechnungsverfahren setzten jedoch lineare Näherungen voraus und waren deshalb nicht geeignet, die tatsächlichen Belastungen hinreichend genau zu erfassen. Des Weiteren beschränkten sich die genannten Autoren in der Hauptsache auf einlagig bewickelte Trommeln. Für die mathematische Beschreibung der Belastungen mehrla-

gig bewickelter Trommeln existierten zu diesem Zeitpunkt nur unzureichende Theorien, die in der Praxis zu überdimensionierten Seiltrommeln führten.

Weiterhin sind die Arbeiten von Bechtloff /13, 14/ zu erwähnen, der erstmals Experimente durchführte, mit denen die Querdehnung von Drahtseilen in Abhängigkeit der Zuglast gemessen wurde.

## 2 Ein Verfahren zur Berechnung ein- und mehrlagig bewickelter Seiltrommeln

In Fortsetzung der vorgenannten Arbeiten, stellte Peter Dietz im Rahmen seiner 1971 veröffentlichten Dissertation /15/ ein Verfahren zur Berechnung ein- und mehrlagig bewickelter Seiltrommeln vor, das heute noch die wissenschaftlich fundierte Grundlage für die Festigkeitsberechnung dieses Maschinenelementes ist.



- Ermittlung der Mantelbeanspruchungen mit der Schalentheorie
- Ermittlung der Bordscheibenbeanspruchung mit der Plattentheorie
- Rotationssymmetrische Lastannahmen
- Bei Mehrlagigkeit Beeinflussung der Lagenbeanspruchung durch die Elastizität der Seile
- Statisch unbestimmtes Problem mit statisch unbestimmtem Hauptsystem

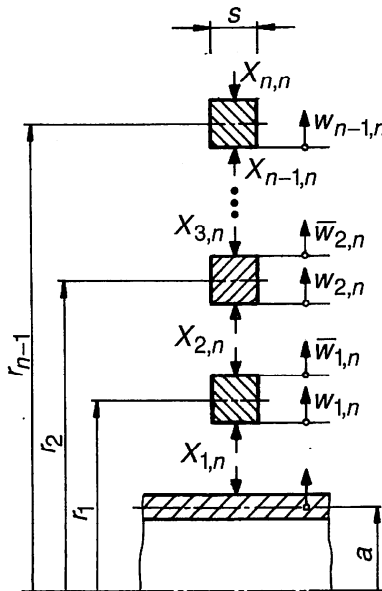
**Bild 5:** Trommelbelastungsmodell nach Dietz /15/

Aufbauend auf der Theorie der rotationssymmetrisch belasteten Kreiszyinderschale entwickelte er einen Berechnungsansatz, der es ermöglicht, den Beanspruchungszustand an jeder beliebigen Stelle einer mehrlagig bewickelten Trommel zu bestimmen (**Bild 5**). Mit Hilfe der von ihm eingeführten linearen Übertragungsmatrizen ist es

möglich, den Einfluss verschiedener Zwischen- und Bordscheibengeometrien zu berücksichtigen.

Weiterhin betrachtet er in seiner Arbeit den Effekt der Seil- bzw. Trommelentlastung aufgrund elastischer Verformungen. Er detailliert diesen schon von Ernst /8/ für einlagig bewickelte Seiltrommeln beschriebenen Mechanismus und erweitert die Theorie für die mehrlagig bewickelte Seiltrommel.

Neben den Untersuchungen am Trommelgrundkörper widmet sich Dietz den Belastungen der Bordscheiben. Der von den Seilwindungen auf die Bordscheiben ausgeübte axiale Druck wurde erstmals von Waters /5/ mittels der Keileffekt-Theorie beschrieben, die die Einflüsse des mit der Lagenzahl steigenden Lagenradius vernachlässigt. Ein Biegemoment für die Bordscheibe kann aufgrund des fehlenden Hebelarms mit dieser Methode nicht ermittelt werden. Dietz entwickelt mit seiner „Theorie der aufsteigenden letzten Windung“ einen neuen verbesserten Berechnungsansatz, mit dem der Lagenradius als Einflussparameter berücksichtigt wird (**Bild 6**).



**Bild 6:** Abstraktion des Seilpaketes nach Dietz /15/

Die neuartige mathematische Beschreibung des Seilentlastungseffekts und der Bordscheibenbelastung hängt wesentlich von der Querelasti-

zität der Seile ab. Diese wurde von Peter Dietz erstmals durch umfangreiche Versuchsreihen unter praxisnahen Prüfbedingungen ermittelt. Für die einfache praktische Anwendung der mit hohem numerischen Aufwand verbundenen Dimensionierungsvorschriften wurde von Dietz ein Trommeldimensionierungsprogramm erstellt.

### **3            Forschungsarbeiten am Institut**

In den Anfangsjahren der Tätigkeit von Peter Dietz als Direktor des Instituts für Maschinenwesen konzentrierten sich die Arbeiten auf dem Gebiet der Seiltrommelforschung auf die Untersuchung der Bordscheibenbelastung. Eine unter seiner Betreuung durchgeführte Studienarbeit befasste sich mit dem Vergleich experimentell und analytisch bestimmter Beanspruchungswerte. Auf dieser Grundlage wurde das von Ihm entwickelte Berechnungsprogramm erweitert, so dass auch die an einem frei wählbaren Radius der Bordscheibe auftretenden Linien-(biege)-momente bestimmt werden können.

Einen weiteren Schwerpunkt der Arbeiten bildete, in Zusammenarbeit mit Industrieunternehmen, die Untersuchung praktischer Anwendungsfälle und deren Optimierung hinsichtlich ihres Festigkeits- und Verformungsverhaltens. Hierzu seien nur auszugsweise erwähnt:

- die Umgestaltung von Bordscheibenringen zur Minimierung der im Betrieb auftretenden Verformungen unter Berücksichtigung unterschiedlicher Lagerbedingungen des Trommelgrundkörpers /16/,
- Festigkeitsuntersuchungen von Förderseiltrommeln unter rotationssymmetrischer und –unsymmetrischer Last /17/,
- Grundlagenbetrachtungen für die Baureihen- und Baukastensystematik für Berge- und Kranwinden,
- Optimierung von Windentrommeln mit Berücksichtigung teilplastischen Materialverhaltens.

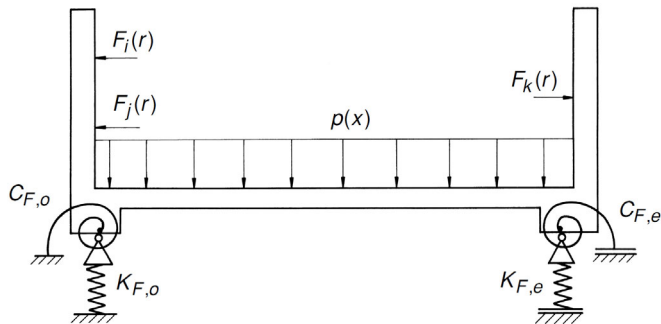
Daneben wurden auch tangierende Themen, wie die Untersuchung verschiedener Schäkelformen bei symmetrisch und asymmetrisch angreifenden Lasten /18/ sowie die Festigkeitsuntersuchung von Treibscheiben behandelt /19/.

Seit Mitte der 90er Jahre wurden, gefördert durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft und die Stiftung Industrieforschung verstärkt Grundlagenuntersuchungen auf dem Gebiet der Gestaltung und Berechnung von Leichtbauwindentrommeln durchgeführt.

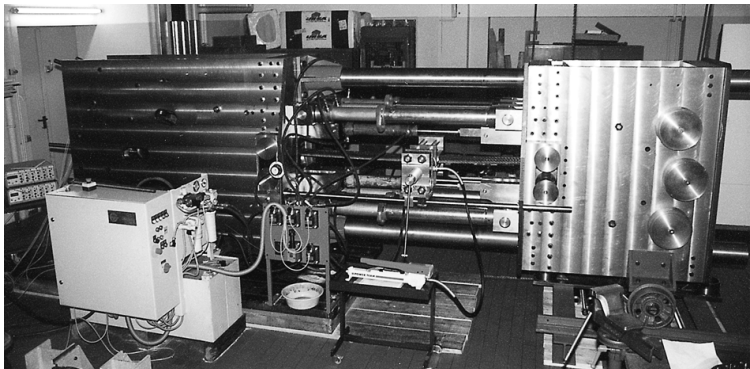
Henschel /20/ ergänzt die Theorie der Trommelmantelbelastung mit der Einführung eines veränderlichen Querelastizitätsmoduls mit der Lagenzahl durch den Einsatz von linearen bzw. quadratischen Funkti-

onen. Dies liegt vor allem daran, dass die Seile ein nicht lineares und von starker Hysterese geprägtes Verformungsverhalten in Längs- und Querrichtung zeigen. Dieses Verhalten besitzt wiederum einen wesentlichen Einfluss auf die Beanspruchung der Seiltrommeln.

Mupende /21/ entwickelt eine gekoppelte Theorie für Mantel und Bordscheiben, welche insbesondere die kritischen Beanspruchungen im Übergangsbereich zwischen beiden Komponenten - auch abhängig vom Verhältnis der Steifigkeiten von Mantel und Bordscheiben - darstellt. **Bild 7** zeigt die Beanspruchungen an der Übergangsstelle in Abhängigkeit des Steifigkeitsverhältnisses der Mantelschale zur Bordscheibe (Kreisringplatte).



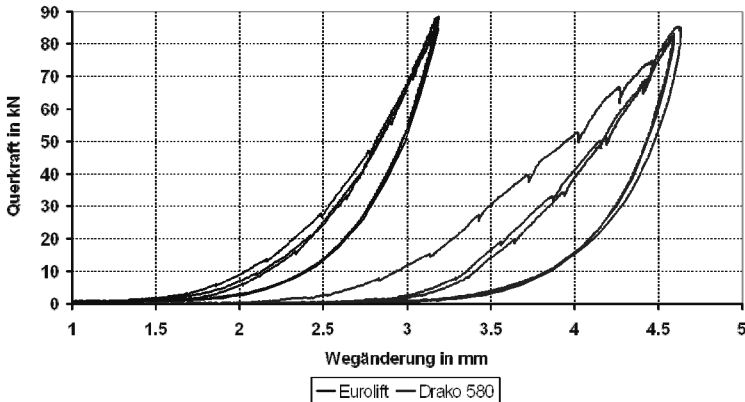
**Bild 7:** Mechanisches Modell der Trommelberechnung, Ansatz nach Mupende /21/



**Bild 8:** Prüfstand zur Ermittlung der Längs- und Quersteifigkeit von Drahtseilen für verschiedene Einbautagen in der Trommel (Seildurchmesser von 7 bis 32 mm, Zugkraft in Längsrichtung bis 1200 kN, Druckkraft in Querrichtung bis 500 kN) /23/



Ausgangspunkt aller Überlegungen zur Dimensionierung von Trommeln ist die Kenntnis des Seilverhaltens in Längs- und Querrichtung und ihre Beschreibung als lineare bzw. bereichsweise linearisierte (vergl. /20/) elastische Eigenschaft in dem Formelwerk der Berechnung. Die Seilelastizitätswerte sind von der Verseilungsart abhängig und können nur experimentell ermittelt werden. **Bild 8** zeigt die am Institut für Maschinenwesen aufgebaute Versuchseinrichtung zur Messung der Seileigenschaften. Die Ergebnisse der Versuche sind in **Bild 9** abgebildet. Es wird deutlich, dass das Verhältnis von Längs- zu Quersteifigkeit, welches für den Entlastungsvorgang nach **Bild 6** maßgebend ist, von der Verseilungsart und von der aktuellen Längskraft in erheblichem Maße abhängt. Neben dieser stationären Prüfeinrichtung für den Querelastizitätsmodul wurde von Stahr et al. /24/ ein mobiles Prüfgerät für Querelastizitäten von Seilen bis zum Durchmesser von 100 mm entwickelt und aufgebaut.

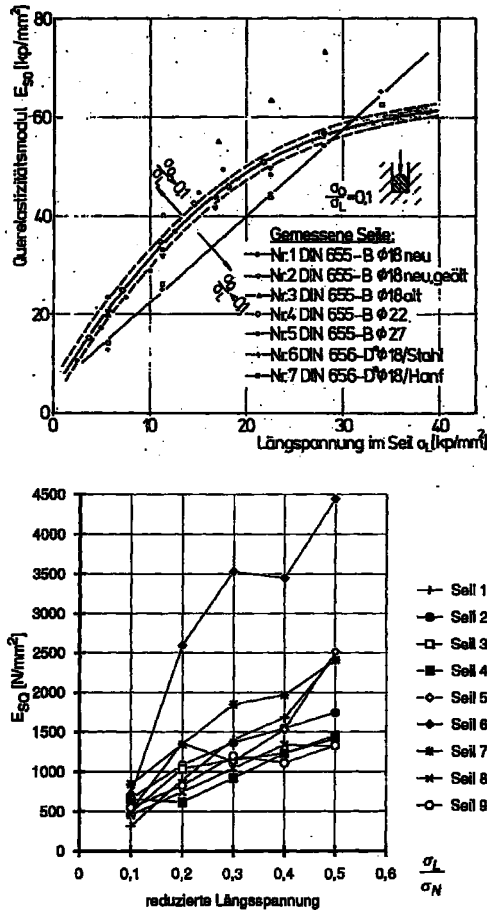


**Bild9:** Hysterese für mehrfache Belastung ( $K_L = 0,2; 4$  Seile;  $\varnothing 14$  mm) in Querrichtung bei in Längsrichtung vorgespannten Seilen als Grundlage für die Entlastungsrechnung /20/

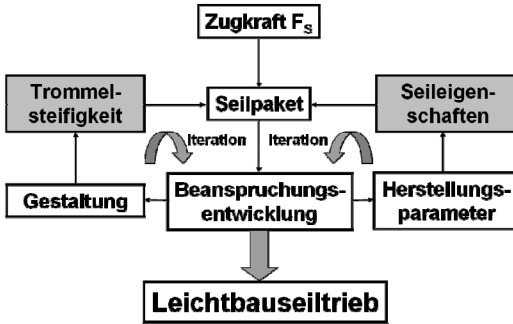
Die mit diesem Prüfstand gemessenen Werte zeigen auch deutlich, welche innovativen Anstrengungen zur Entwicklung von Drahtseilen für Hochleistungsanwendungen in den letzten 20 Jahren unternommen wurden. In **Bild 10** oben sind Messwerte für 1970, übliche Seile dargestellt, während die Messung an hochverdichteten Seilen um 1995 (Darstellung unten) zeigen, dass die Verseilungsart neben einer erheblichen Steigerung der Tragkräfte auch eine Erhöhung der Längs- und der Querelastizität zu Folge haben - was im Sinne des in **Bild 3** gezeigten Beanspruchungsmodells schädlich für die Trommel ist. Eine

Reihe von Schadensfällen in den vergangenen Jahren ist auf die nicht hinreichend berücksichtigte Veränderung des Elastizitätsverhaltens moderner Seile zurückzuführen.

Mit diesen Erkenntnissen erweist sich die Beanspruchung und Verformung an Seiltrommeln als ein komplexes Problem, das mit dem Last-Verformungsverhalten von Seilpaket und Trommel in gegenseitiger Abhängigkeit verbunden ist (**Bild 11**). Da jede Trommel und jedes Seil zu einem spezifischen System führen, sind allgemeine Aussagen nur sehr bedingt zuverlässig, jedes Problem erfordert dank der vielfältig möglichen Gestaltung von Trommel und Seilstrukturen eine eingehende Berechnung.



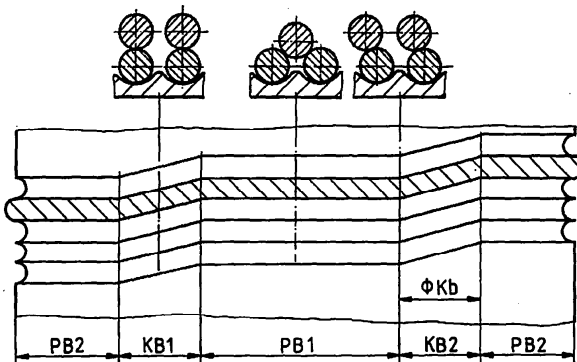
**Bild 10:** Abhängigkeit der Seilsteifigkeiten von der Seilbauart. Oben: Seal- und Warringtonseile 1967. Unten: Verdichtete Seile 1995



**Bild 11:** Gegenseitige Abhängigkeit des Last-Verformungsverhaltens von Seilpaket und Trommel

### 3.1 Nicht rotationssymmetrische Belastungen

Die Annahme rotationssymmetrischer Belastungsverhältnisse, die allen bisherigen Berechnungsmethoden zugrunde liegt, bildet die in der Praxis beobachtete und experimentell nachgewiesene Umfangslastverteilung auf Mantel und Bordscheiben nicht exakt ab. Dies gilt insbesondere für Seiltrommeln mit einer Mantelrillung nach dem LeBus-Prinzip. Das Rillungssystem nach LeBus ist durch vier Umfangsbereiche charakterisiert. Dies sind zwei Parallelabschnitte (PB) und zwei Kreuzungsabschnitte (KB), in denen das Seil jeweils um eine halbe Steigungsbreite in Axialrichtung abgelenkt wird (**Bild 12**). Die Winkelausdehnung des Parallel- und Kreuzungsbereiches und die Rillungssteigung variieren von Konstruktion zu Konstruktion. Sie sind vom Einsatzfall, dem Seildurchmesser, den Seiltoleranzen, den Trommelabmessungen und der Seilbiegesteifigkeit abhängig.



**Bild 12:** Anordnung der Seilwindungen im Parallel- und Kreuzungsbereich

Durch die definierte Seilführung ist die Anordnung der Seilwindungen für den Parallel- und Kreuzungsbereich fest vorgegeben. **Bild 12** verdeutlicht die sich verändernden Kontaktverhältnisse an drei ausgewählten Schnitten des Mantelumfanga in idealisierter Form. Eine Verschiebung der Kreuzungsbereiche von Seillage zu Seillage, wie sie in begrenztem Maße praktisch auftritt, wurde hier nicht betrachtet. Es kann grundsätzlich unterschieden werden zwischen:

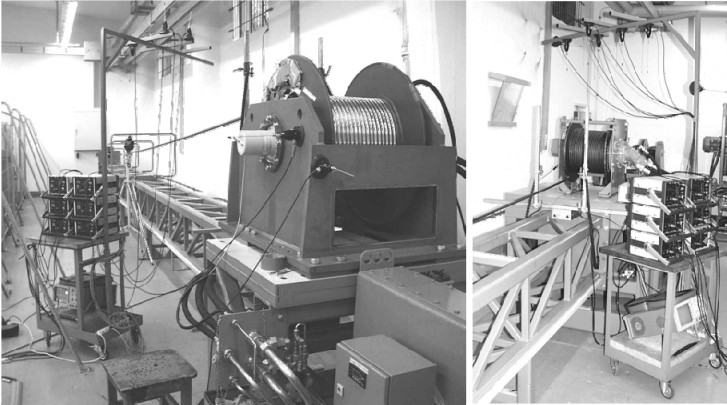
*Mitte des Kreuzungsbereiches:* Die Windungen der oberen Lage erreichen ihren höchsten Punkt beim Überrollen der unteren Seilwindungen. Es liegt eine säulenförmige Stapelung der Seilquerschnitte vor.

*Mitte des Parallelbereiches:* Die Windungen der oberen Seillage werden in den Lücken der unteren Windungen geführt. Das Wickelbild ist in diesem Bereich durch eine pyramidale Stapelung der Seilquerschnitte gekennzeichnet.

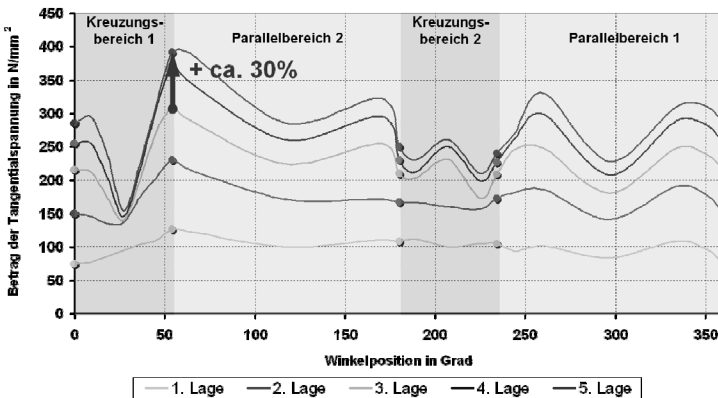
*Beginn des Kreuzungsbereiches:* Die oberen Windungen werden durch die Vorgängerwindungen oder durch Führungskeile an der Bordscheibe abgelenkt und beginnen die darunter liegenden Windungen zu überrollen.

Zur Untersuchung wurden am Universal-Seiltrommelprüfstand des Institutes (**Bild 13**) Wickelversuche durchgeführt, deren Ergebnis **Bild 14** zeigt. Die Kurvenverläufe stellen den Verlauf der Tangentialspannungen bei konstanter Zugkraft  $F_s$  und zunehmender Lagenanzahl dar. Entgegen der Erwartung eines nahezu gleichmäßigen Beanspruchungsverlaufes über dem Umfang des Mantels treten ab der zweiten Seillage deutliche Unterschiede in den Tangentialspannungswerten auf, die sich mit zunehmender Bewicklung vergrößern. Bei Vollbewicklung mit fünf Lagen weichen die minimalen und maximalen Tangentialspannungen um ca. 45% voneinander ab.

Im Rahmen einer Forschungsarbeit /22/ wurde der kausale Zusammenhang zwischen den experimentell festgestellten Beanspruchungsunterschieden und einer nicht-rotationssymmetrischen Druckbelastung  $p(x,\phi)$  des Trommelmantels durch das Seilpaket näher beleuchtet: Das Bewickeln der ersten Seillage erfolgt sowohl im Parallel- als auch im Kreuzungsbereich über dem gesamten Umfang mit einem konstanten Wickelradius (**Bild 15**;  $r_{pb,i} = r_{kb,i}$ ). Ab der zweiten Seillage ändert sich der Wickelradius über dem Umfang des Trommelmantels infolge des Überrollens der unteren Windungen innerhalb des Kreuzungsbereiches. Zwischen beiden Rillungsbereichen entsteht demnach ein Wickelradienunterschied  $\Delta r_i$ .



**Bild 13:** Universal-Seiltrommelprüfstand des Instituts für Maschinenwesen: Seildurchmesser von 12 bis 36 mm; Seilzugkraft bis 300 kN; Seilgeschwindigkeit bis 40 m/min; Trommelabmessungen bis 1000 mm Länge und 800 mm Durchmesser

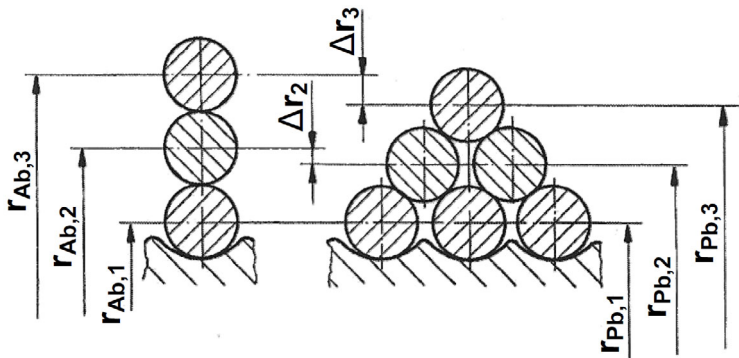


**Bild 14:** Nicht-rotationssymmetrische Tangentialspannungsverteilung im Trommelmantel am inneren Umfang des Trommelmantels auf einer Schnittebene

Aus experimentellen Untersuchungen ist ferner bekannt, dass der Querelastizitätsmodul der pyramidalen Seilwindungsanordnung im Parallelbereich ca. 70% des Wertes für die Säulenordnung im Kreuzungsbereich beträgt /20/. Aufgrund der daraus resultierenden unterschiedlichen Seillagenverformung ergeben sich im Parallel- und Kreuzungsbereich unterschiedliche Wickeldrücke.

Die Trommel wird dadurch nicht rotationssymmetrisch belastet und erfährt Biegespannungen bzw. Biegeverformungen in Abhängigkeit vom Umfangswinkel. Hieraus lassen sich z.B. optimale Bereichswinkel für den Parallel- und den Kreuzungsbereich ableiten, in denen die geringsten Biegespannungen auftreten.

Auch auf die Beanspruchung der Bordscheiben hat die unsymmetrische Belastung, die nach dem Prinzip der „aufsteigenden Windung“ eine Funktion des Umfangswinkels ist, eine erhebliche Auswirkung: Die Bordscheibe "verbeult" sich deutlich ungleichmäßig und kann sowohl durch ihre Abweichungen aber auch durch die Beanspruchungsmaxima in der Anbindung an den Mantel zu Ausfällen führen.



**Bild 15:** Unterschied  $\Delta r_i$  zwischen dem Wickelradius  $r_{pb,i}$  im Parallelbereich und  $r_{kb,i}$  im Kreuzungsbereich /22/

#### 4 Zusammenfassung

Die Beanspruchung von mehrlagig bewickelten Seiltrommeln ist durch das elastische Zusammenspiel von Seilpaket und Trommelstruktur bestimmt. Die Annahme rotationssymmetrischer Belastungen führt zusammen mit einer Theorie der Lagenentlastungen und der Beanspruchung an den Bordscheiben zu einem Modell, mit dem in den letzten Jahren Seiltrommeln mit mehrlagigen Bewicklungen immer weiter in Richtung Leichtbaustrukturen entwickelt werden konnten.

Auch die Ausnutzung der teilplastischen Verformungen im Trommelmantel führt zu einer Erhöhung der Tragfähigkeit, wobei aber neue Belastungsgrenzen beachtet werden müssen, die auf der Verformung von Trommelmantel und Bordscheibe beruhen.

Insbesondere Seiltrommeln mit LeBus-Bewicklung zeigen Beanspruchungen und Verformungen auf, die nicht rotationssymmetrisch sind. Es wird eine Theorie vorgestellt, die auch diese Bewicklungsart in die Dimensionierung von Trommeln mit einbezieht.

## 5 Literatur

- /1/ Bernoit, G.: Zum Gedächtnis an W. A. Albert und die Erfindung seines Drahtseils. VDI-Verlag GmbH, Berlin NW71935
- /2/ Felten & Guillaume Carlswerk: Drahtseile. M. DuMont Schauberg, Köln 1977
- /3/ Altpeter, H.: Die Drahtseile - ihre Konstruktion, Herstellung und Bewertung. Draht-Welt, Berlin-Charlottenburg 1953
- /4/ VDI-Zeitschrift, Jahresband 1876
- /5/ Waters, E. O.: Rational Design of Hoisting Drums. The American Society of Mechanical Engineers, New York 1920
- /6/ Kleinn: Die Wandstärke von Drahtseiltrommeln für Hebemaschinen. Maschinenkonstruktion 1927
- /7/ John, H.: Wickeltrommeln für Drachenwinden. Analen der Hydrographie und maritimen Meteorologie, Juli 1927
- /8/ Ernst, H.: Die Hebezeuge Band I-III. Vieweg & Sohn, Braunschweig 1958
- /9/ Biezeno, C. B.; Grammel, R.: Technische Dynamik. Springer Verlag 1939
- /10/ Eßlinger, M.: Berechnung von Seiltrommeln. Der Stahlbau Nr. 23, 1954
- /11/ Woywode, N.: Gestaltung und Berechnung geschweißter Seiltrommeln. Schweißtechnik Nr. 17, 1967
- /12/ Hoeland, G.: Ein Beitrag zur Berechnung von Seiltrommeln unter Berücksichtigung der Verformungen und der Reibung zwischen Seil und Trommel. Fördern und Heben Nr. 19, 1969
- /13/ Bechtloff, G.: Das elastische Verhalten zugbelasteter Drahtseile. Dissertation, Braunschweig 1961
- /14/ Bechtloff, G.: Die Beanspruchung des Drahtseilquerschnitts unter Längslast und ebener Querpressung. Draht-Welt, Düsseldorf Nr. 55, 1969
- /15/ Dietz, P.: Ein Verfahren zur Berechnung ein- und mehrlagig bewickelter Seiltrommeln. Dissertation TH Darmstadt 1971, VDI-Verlag GmbH, Düsseldorf 1972

- /16/ Zapf, R.: Festigkeits- und verformungsgerechte Optimierung einer Seiltrommelsonderkonstruktion. Mitteilungen des Instituts für Maschinenwesen, Clausthal 1984
- /17/ Wächter, M.: Finite Elemente Untersuchung an einer Förderseiltrommel. Mitteilungen des Instituts für Maschinenwesen, Clausthal 1988
- /18/ Villmer, F.-J.: Untersuchung des Spannungszustandes in Schäkeln mit Hilfe der Finite Elemente Methode (FEM) und Optimierung der Schäkelform. Mitteilungen des Instituts für Maschinenwesen, Clausthal 1986
- /19/ Bock, U.: Finite Elemente Untersuchung der Beanspruchung einer Treibscheibe. Mitteilungen des Instituts für Maschinenwesen, Clausthal 1991
- /20/ Henschel, J.: Dimensionierung von Windentrommeln. Dissertation, TU Clausthal, 2000
- /21/ Mupende, I.: Beanspruchungs- und Verformungsverhalten des Systems Trommelmantel-Bordscheiben bei mehrlagig bewickelten Seiltrommeln unter elastischem und teilplastischem Werkstoffverhalten. Dissertation, TU Clausthal, 2001
- /22/ Otto, St.: Ein nicht-rotationssymmetrisches Belastungsmodell für die Ermittlung des Beanspruchungsverhaltens mehrlagig bewickelter Seiltrommeln. Dissertation, TU Clausthal, 2003
- /23/ Henschel, J; Mupende, I.: Konstruktion eines Prüfstandes zur Messung des Querelastizitätsmoduls von Drahtseilen. Mitteilungen des Instituts für Maschinenwesen, Clausthal 1997
- /24/ Stahr, K.; Wächter, M.: Tradition und Zukunft – Aktivitäten in der Seilforschung am Institut für Maschinenwesen. Mitteilungen des Instituts für Maschinenwesen, Clausthal 2009