

Topologieoptimierung von Seilscheiben

Topology Optimization of pulleys

Artur Katkow
Karl-Heinz Wehking

Institut für Fördertechnik und Logistik
Abteilung Maschinenentwicklung und Materialflussautomatisierung
Universität Stuttgart

Die Topologieoptimierung hat sich in den letzten Jahren zu einer sehr praktischen und vielseitig einsetzbaren Design- und Entwicklungsmethode entwickelt. Diese Methode soll nun an einer Seilscheibe, die aus der Industrie nicht mehr wegzudenken ist, angewendet werden. Im Vordergrund steht vor allem die Reduzierung der Masse sowie die Anpassung der Speichenform an die unterschiedlichen Randbedingungen.

[Schlüsselwörter: Topologieoptimierung, Strukturoptimierung, Seilscheibe, Gewichtsreduktion]

The topology optimization has evolved in recent years to a very practical and versatile design and development method. This method will now be applied to a pulley, which is an integral part of the industry. The focus is mainly the reduction of the mass and the adaptation of the spokes shape to the different boundary conditions.

[Keywords: Topology Optimization, structural Optimization, pulley, weight reduction]

1 EINLEITUNG

Heutzutage ist der Einsatz einer Seilscheibe und die damit verbundene Umlenkung sowie Aufnahme eines Drahtseils aus der Industrie nicht wegzudenken. Vorallem große Seilscheiben, die mit einer hohen Sicherheitsrelevanz in Schachtförderanlagen, Seilbahnen, Schiffshebewerken, usw. Anwendung finden, unterliegen einer genauen Betrachtung sowie Auslegung für unterschiedliche Randbedingungen.

Mit der DIN 22410 lässt sich beispielsweise eine Seilscheibe für Schachtförderanlagen bis auf die Gestaltung zwischen Laufkranz und Nabe auslegen. Abhängig von den Randbedingungen entscheidet der Hersteller welche Seilscheibenart für eine optimale Belastungsaufnahme verwendet werden soll. Dabei kann er sich zwischen einer Vollwandscheibe und einer Speichenscheibe entscheiden.

Letztere wird anhand von Erfahrungswerten, die die Form bzw. Anzahl der Speichen festlegt, bestimmt.

Eine Vollwandscheibe hingegen wird aus einem Vollmaterial gedreht oder gegossen. Zur Reduzierung der Masse wird zumeist Material aus dem Bereich zwischen Laufkranz und Nabe entnommen. Dies führt jedoch gleichzeitig, je nach Belastungsfall, zu einer Spannungserhöhung im Bereich der Speichen.

2 ZIELE

Ziel dieser Arbeit ist die Untersuchung von Vollwandscheiben auf mögliches Optimierungspotential des Gewichts. Es soll ferner analysiert werden ob es für die unterschiedlichen Belastungsfälle eine optimale Anordnung des Materials zwischen dem Laufkranz und der Nabe gibt. Hierzu müssen zunächst realitätsbezogene Lastfälle aus der Industrie herangezogen werden. Neben einer Umlenkscheibe, die lediglich für die Führung eines Drahtseils verwendet wird, hat eine Treibscheibe zusätzliche Momente bzw. Kräfte, die berücksichtigt werden müssen. Sie resultieren unter anderem aus dem zusätzlichen Antriebsmoment des Motors, der reibschlüssig auf das Drahtseil übertragen wird. Die direkte Gegenüberstellung beider Systeme lässt vermuten, dass eine Treibscheibe aufgrund der größeren Belastung, ein höheres Gewicht aufweisen muss, im Gegensatz zu einer Umlenkscheibe. Deshalb ist eine gezielte Anpassung der Randbedingungen an die zu fertigende Seilscheibe, unter der Berücksichtigung des Gewichtes, sehr wichtig.

3 GRUNDLAGEN

Zunächst wird auf die Grundlagen eingegangen, die in den ersten Ergebnissen der Untersuchung verwendet wurden.

3.1 AUFBAU VON SEILSCHEIBEN

Eine Seilscheibe ist im Wesentlichen ein technisches Bauteil, welches die Funktion einer fest installierten Rolle

hat. Je nach Dimension lässt sich diese aus einem Vollmaterial drehen oder gießen. Grundsätzlich lassen sich zwei Typen von Seilscheiben unterscheiden; mit Speichen oder als Vollwandscheibe. (siehe Abbildung 1)



Abbildung 1. (links) mit Speichen (rechts) Vollwandscheibe [Kat12]

Normalerweise werden Seilscheiben mit Speichen im Bergbau und Vollwandscheiben in Seilbahnen eingesetzt. Die Auslegung einer Seilscheibe ist herstellerabhängig und unterliegt einer detaillierten Klärung der Randbedingungen. Somit kann der Hersteller entscheiden welche Dimension, Typ und Speichenanzahl die Seilscheibe, unter Beachtung der Sicherheit, haben muss.

Eine Seilscheibe besteht zumeist aus drei Einzelteilen. Im Weiteren wird auf diese näher eingegangen.

3.1.1 LAUFKRANZ

Der Laufkranz ist für die Aufnahme des zu führenden Drahtseils zuständig. Dabei spielt die Auslegung des Rillenradius eine wichtige Rolle. Es ist darauf zu achten, dass der Rillenradius das 0,53-fache des Seildurchmessers hat. Außerdem soll der Laufkranz durch seinen Aufbau das Herausrutschen des Drahtseils verhindern.

3.1.2 NABE

Die Nabe überträgt die wirkenden Kräfte ausgehend vom Drahtseil auf die Achse und über diese dann auf die Lager. Für die sichere Aufnahme der Achse wird die Nabe aus zwei Teilen hergestellt. Eine einteilige Nabe ist ebenso möglich, erfordert jedoch einen erheblichen Mehraufwand bei der Auslegung.

3.1.3 SPEICHEN

Zwischen dem Laufkranz und der Nabe werden Speichen oder eine Vollwand integriert. Diese werden untereinander entweder verschweißt oder verschraubt. Die Auslegung der Speichenanzahl ist wie bereits erwähnt herstellerabhängig. Zumeist kommen hier Doppel-T-Träger, U-Profile oder Winkelprofile zum Einsatz. Bei Vollwandscheiben wird Material für die Versteifung und Gewichtsreduzierung entnommen.

Für die Auslegung der Speichen und Vollwandausschnitte gibt es keine einheitliche Vorgehensweise. Somit

wird jede Seilscheibe individuell für den Kunden gefertigt. Zumeist beruht die Herstellung auf Erfahrungswerte und ist stark überdimensioniert.

3.2 KRÄFTE ZWISCHEN DRAHTSEIL UND SEILSCHEIBE

1965 konnte Schmidt [Sch65] mit seiner Arbeit erstmals den Bezug zwischen der Seilsteifigkeit und der Biegesteifigkeit des Drahtseils herstellen. Er ging davon aus, dass sich die Seilbiegesteifigkeit am Auf- und Ablaufpunkt additiv aus einem elastischen Anteil und einem Anteil aus der inneren Reibung zusammensetzt. Aus dieser Annahme wurden Momentengleichgewichte am Auf- bzw. Ablaufpunkt gebildet, die bis auf das Vorzeichen identisch sind (Abbildung 2).

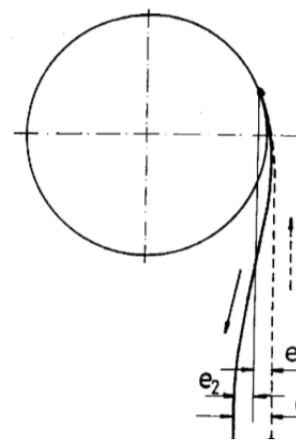


Abbildung 2. Auf- und Ablaufkurve [Sch65]

Durch mehrere Methoden wurde die Behauptung der Gleichheit des Reibungsmoments bei Auf- und Ablauf gestützt. Außerdem konnte festgestellt werden, dass der Auflauf stets später und der Ablauf stets früher stattfindet, als der eines biegeschlaffen Fadens. Der Auf- bzw. Ablaufwinkel ändert sich dabei kaum.

Acht Jahre später beschäftigen sich Manchini und Rosetti [MaRo73] sowie 1975 Wiek [Wie75] mit weiteren Spannungsmessungen. Abbildung 3 zeigt eine abgezeichnete neuere Messung nach Schiffner [Sch87]. Dabei wurde der DMS direkt an einen Einzeldraht geklebt. Der Spannungsverlauf ist gekennzeichnet durch eine leichte Spannungsreduzierung, bevor die typische Spitze am Auflaufpunkt erreicht wird. Nach dem Auflaufpunkt schließt sich ein „Tal“ an, woraufhin ein Abschnitt konstanter Spannung folgt. Anschließend erfolgt ein Anstieg der Spannung zur Ablaufspitze und im Weiteren in ein „tiefes Tal“. Es steigt auf den ursprünglichen Wert an und sinkt dann etwas ab, bevor sie endgültig wieder konstant wird. (siehe Abbildung 3)

In seiner Forschungsarbeit von 1995 beschäftigt sich Häberle [Häb95] unter anderem mit der Ermittlung der sekundären Zugspannung und erweitert sie in seinen Versuchen zur längenbezogenen Anpresskraft. Die Messein-

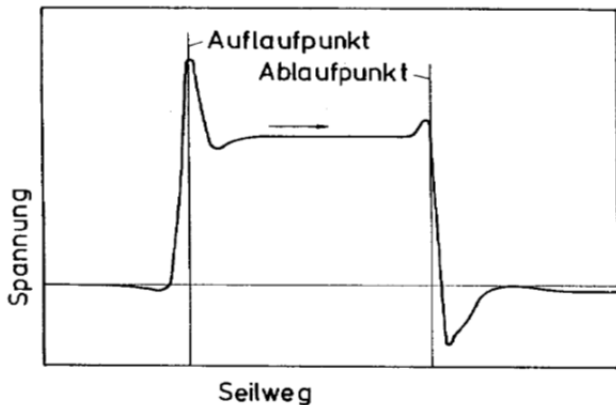


Abbildung 3. Längsspannungen beim Lauf eines Drahtseils über die Scheibe [Sch87]

richtung ist in Abbildung 4 dargestellt. Das Kammsegment besteht aus 2 kammartigen Segmenten, die 35 Messlamellen aufnehmen, von denen die mittleren 9 zur Ermittlung der längenbezogenen Anpresskraft dienen. Auf den Messlamellen sind 4 DMS mit je einem Längs- und Quergitter, zu einer Vollbrücke geschaltet, angebracht. Dies dient der ausschließlichen Messung der Druckspannung, da die Biegespannungen in beiden Biegerichtungen, aufgrund der Beschaltung kompensiert werden. Die Messungen erfolgen mit unterschiedlichen Drahtseilen und unterschiedlichen Zugkräften.

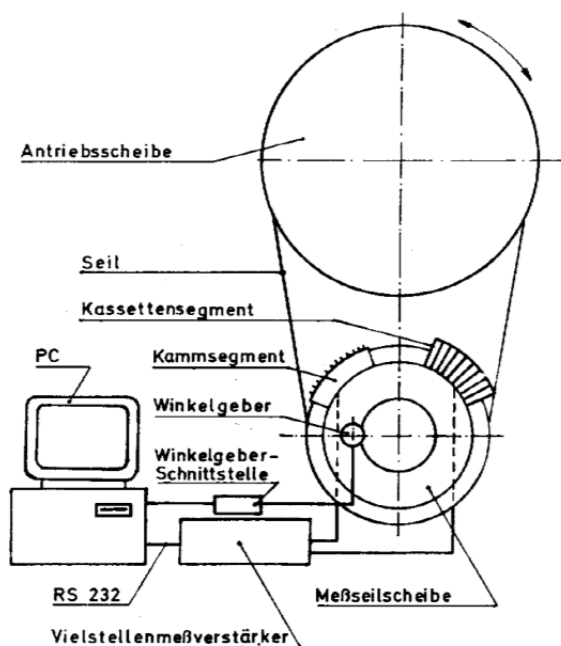


Abbildung 4. (links) Übersicht Messeinrichtung, (rechts) Kammsegment mit Messlamelle [Hüb95]

3.3 TOPOLOGIEOPTIMIERUNG

In den letzten Jahren hat sich die Topologieoptimierung (TO) zu einer sehr praktischen und vielseitig einsetzbaren Design- und Entwicklungsmethode entwickelt.

Die Automobilindustrie profitiert bereits seit Jahren von der Technologie, die nun auch in anderen Bereichen vermehrt ihren Einsatz findet. Vor allem in den Industrien für Verbrauchsgüter und dem Flugzeugbau wurde zunehmend der Nutzen der TO erkannt. Dabei spielt die Treibstoffreduzierung und die damit verknüpfte Gewichtsreduzierung der einzelnen Bauteile eine wesentliche Rolle. Ziel der TO ist neben der Reduzierung des Bauteilgewichts eine Erhöhung der Steifigkeit. In diesem Kapitel werden die Grundlagen sowie die Verfahren der TO näher erläutert. [Sch04]

3.3.1 THEORETISCHE GRUNDLAGEN

Die Lage und Anordnung von Strukturelementen, die als Topologie bezeichnet wird, kann das Strukturverhalten entscheidend beeinflussen. Daher ist es zwingend erforderlich die TO in einem sehr frühen Stadium des Entwurfsprozesses durchzuführen. Ein Vorteil der TO gegenüber anderen Optimierungsformen beruht auf der Tatsache, dass neben der Dimensionierung und der äußeren Konturen, die Ausbildung von Löchern innerhalb der Struktur zugelassen wird. Trotz der höheren Komplexität ist die Handhabung der TO wesentlich einfacher gegenüber der Dimensionierung des Modells, da die Löcher nur simuliert werden. Dabei spielt der E-Modul des Materials eine wichtige Größe. Jedes Element des Modells besitzt diese Eigenschaft, die in ihrem Wert während der TO variiert. Während dieses Prozesses entstehen Elemente mit einem kleinen Wert, die die Eigenschaft eines weichen Materials besitzen. Diese werden in der Struktur als Löcher (Lochelement) dargestellt. Elemente mit dem maximalen Wert werden dagegen als Festkörper (massives Element) symbolisiert.

Abbildung 5 zeigt beispielhaft eine auf der TO basierende Optimierung eines Hinterachsträgers. Nach Klärung der Randbedingungen wird ein Quader mit definierten Kräften bzw. Lagerungen versehen. Nach der TO entsteht ein poröses Modell welches zuletzt mittels CAD nachbearbeitet werden muss.

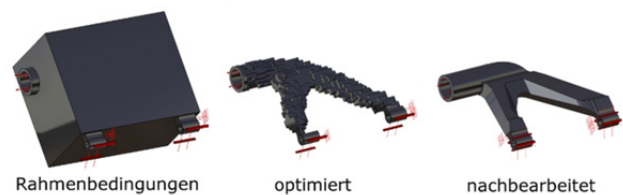


Abbildung 5. TO von einem Hinterachsträger

Aus numerischen Gründen kann der E-Modul keinen Wert von null annehmen, was für die Simulation der Lochbereiche optimal wäre. Um dennoch die numerische Stabilität zu gewährleisten, müssen geringe Grenzwerte definiert werden. Grundsätzlich lässt sich die TO in zwei Gruppen aufgeteilt, die sich sowohl in der Formulierung des Optimierungsproblems als auch in der Lösungsmethode unterscheiden. Man spricht von der mathematischen

und der empirischen TO. Auf die letztere wird im Weiteren eingegangen, weil sie die Lösungsmethode der verwendeten Software darstellt. [Sch04]

3.3.2 EMPIRISCHE TO

Im Gegensatz zur mathematischen TO wird beim SKO-Verfahren der E-Modul direkt modifiziert und nicht indirekt über die Elementdichte. Da alle FEM-Programme den E-Modul als Funktion der Elementtemperaturen darstellen können, wird die Variation des E-Moduls über die Variation der Knotentemperaturen gesteuert. Über die Modifikation der Knotentemperaturen wird seitens des FEM-Programms eine gemittelte Elementtemperatur erstellt. Daraus folgt eine indirekte Ermittlung des E-Moduls. Der Zusammenhang zwischen E-Modul und Elementtemperatur kann aus Abbildung 6 entnommen werden.

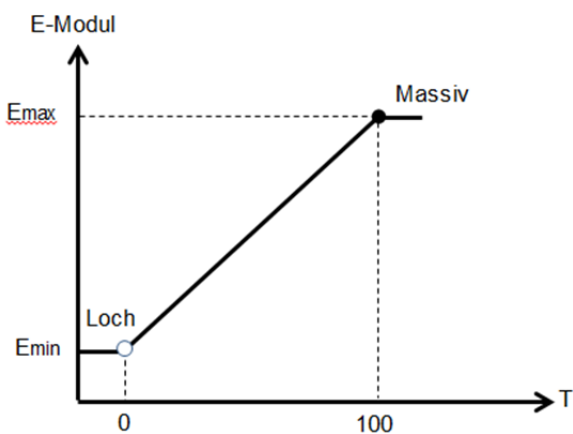


Abbildung 6. Zusammenhang zwischen E-Modul und Elementtemperatur [Har07]

Bei einer Elementtemperatur von $T=0$ folgt der minimale E-Modul (Lochelement) wogegen der maximale E-Modul (massives Element) dem Wert $T=100$ zugeordnet wird. Zwischen den beiden Grenzwerten wird ein linearer Zusammenhang angenommen. Im ersten Schritt des SKO-Verfahrens wird anhand einer FEM-Berechnung die Vergleichsspannung für jeden Knoten bestimmt. Dazu muss zunächst jedem Knoten im Entwurfsraum der Wert $T=100$ und E_{max} gesetzt werden. Mit dem maximalen Spannungswert wird im nächsten Schritt die biologische Wachstumsregel simuliert. Dabei wird vom Benutzer eine Referenzspannung vorgegeben, die die Knoten in hochbelastete und unterbelastete Knoten differenziert. In der Anwendung ist die Wahl einer kleineren Spannung von Vorteil, die dann schrittweise von Iteration zu Iteration auf die Referenzspannung erhöht wird. Dadurch kann die Entfernung von Bereichen, die den Kraftfluss unterbrechen, verhindert werden. Der Detailreichtum wird entweder über kleine Schrittweiten oder eine Verfeinerung des Netzes erreicht.

Normalerweise wird anstatt der Referenzspannung der Füllgrad v definiert, wie es bei der mathematischen TO der Fall ist. Dabei wird seitens des SKO-Verfahrens die Referenzspannung so angepasst, dass die Volumenrestriktion erfüllt wird. Gleichzeitig muss ein Zusammenhang zwischen dem E-Modul und dem Volumen eines Elements angenommen werden.

Beim SKO-Verfahren wird aufgrund der Spannungsverteilung die Ausbildung von Schachbrettmustern vermieden. Dies ist auf den Algorithmus zurückzuführen, welcher für einen glatten Verlauf des optimierten Modells verantwortlich ist. Da an allen Kanten des Elements die gemittelte Spannung verwendet wird, findet eine Filterung und somit eine zusätzliche Glättung statt. [Har07]

4 ERSTE ERKENNTNISSE

Im Rahmen einer Diplomarbeit [Kat12] wurden bereits erste Erkenntnisse über das Potential einer TO von Seilscheiben gesammelt. Hierbei konnte eine realitätsbezogene Seilscheibe, die in der Industrie eingesetzt wird, optimiert werden.

4.1 RANDBEDINGUNGEN

Das verwendete Seilscheibenmodell wurde nach der DIN 22410 ausgelegt und hat die in der Tabelle 1 dargestellten Randbedingungen.

Seilscheibendurchmesser D	5000mm
Drahtseildurchmesser d	62,5mm
Ablenkwinkel	180°
Laufkranz	Nach DIN 22410
Nabe	Nach DIN 22410

Tabelle 1. Seilscheibendaten

Die zugehörigen Lasten sind in Tabelle 2 zusammengestellt. Dabei beschreibt q_0 den konstanten Verlauf der längenbezogenen Anpresskraft und q_{auf} die Kraftspitze am Auflaufpunkt. (siehe Abbildung 3, Kap. 3.2)

Seilkraft	295kN
q_0	118N/mm
q_{auf}	236N/mm

Tabelle 2. Belastungsdaten

In den ersten Untersuchungen wurde ausschließlich eine auf den Seilscheibenkranz wirkende Radialkraft betrachtet.

4.2 ERSTE ERGEBNISSE

Die ersten Resultate der Untersuchung zeigen, dass die TO von Seilscheiben durchaus eine Variante der Gewichtsreduzierung darstellt. In Abbildung 7 ist der Einfluss des Füllgrads aufgezeichnet. Die linke Seilscheibe

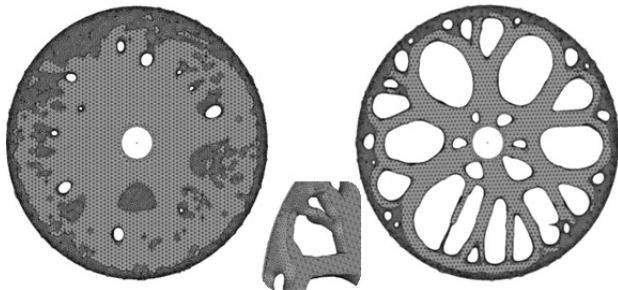


Abbildung 7. (links) 30% und (rechts) 60% Gewichtsreduktion [Kat12]

zeigt eine 30 prozentige Reduzierung des Gewichts. Es lassen sich kleine Löcher feststellen, die keine signifikante Formänderung erzeugen. Durch die Verdopplung des Wertes auf 60% lassen sich bestimmte Formen besser deuten. Es lässt sich jedoch keine eindeutige Symmetrie, die in der Seilscheibenauslegung zwangsläufig notwendig ist, erkennen. Bei Vernachlässigung des unteren Bereiches ist ein kontinuierlicher Wechsel zwischen einem großen und einem kleinen Ausschnitt zu sehen.

Neben dieser Anordnung der Ausschnitte wurde eine andere Abfolge periodischer „Löcher“ seitens der Software erzeugt, die sich grundsätzlich unterscheiden. (siehe Abbildung 8) Bei Betrachtung des Gewichtes beider Vari-

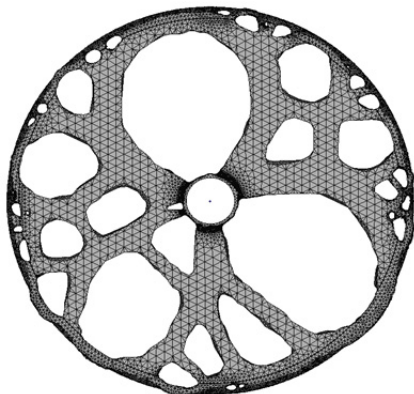


Abbildung 8. Seilscheibe mit 3 großen Ausschnitten [Kat12]

anten ist kein signifikanter Unterschied zu erkennen. Daher wurden beide Formen im Rahmen der ersten Untersuchung näher analysiert und verglichen.

Da die Form der Seilscheibe keine Symmetrie zeigt wurde sie mittels CAD nachbearbeitet und mit FEM nochmals optimiert.

4.3 FAZIT

Die beiden Varianten zeigen nach Abschluss der finalen Optimierung einen ähnlichen Verlauf der Spannung bei Drehung der Seilscheibe, mit einer etwas höheren maximalen Spannung der Seilscheibe mit 3 großen Aus-

	Modell mit 6 großen Ausschnitten	Modell mit 3 großen Ausschnitten
Gewicht	2675kg	2770 kg
max. Spannung	63MPa	70,7 MPa

Tabelle 3. Vergleich der beiden Varianten [Kat12]

schnitten. Das Gewicht der Seilscheibe mit 6 großen Ausschnitten hat eine um ca. 100 kg geringere Masse gegenüber dem anderen Modell. (Tabelle 3)

5 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

In den ersten Untersuchungen konnte gezeigt werden, dass die TO eine gute Möglichkeit der Seilscheibenoptimierung darstellt. Die zwei unterschiedlichen Formen der optimierten Seilscheiben zeigen, dass es durchaus möglich ist zwei grundsätzlich unterschiedliche, gleich gute Ergebnisse bei gleichen Randbedingungen zu erhalten. Die realitätsbezogene Seilscheibe, die als Validierung der Untersuchung dient, hat eine Masse von ca. 5000kg.

In der Realität verfügen die Seilscheiben jedoch über gleichzeitig mehrere Funktionen und somit Randbedingungen. Da die ersten Seilscheiben ausschließlich eine Randbedingung berücksichtigen, müssen im nächsten Schritt weitere Randbedingungen betrachtet werden. Neben der Querkraft, die aus dem Schrägzug eines Drahtseils resultiert, muss auch die Lage der Seilscheibe untersucht werden. Grundsätzlich wird hier zwischen einer stehenden Seilscheibe wie sie im Bergbau Anwendung findet und einer liegenden Seilscheibe, die in Seilbahnen eingesetzt wird, unterschieden. Gleichzeitig müssen die wirkenden Kräfte am Auf- bzw. Ablaufpunkt an die jeweilige Situation angepasst werden. Wird das Drahtseil ausschließlich umgelenkt, ist die längenbezogenen Anpresskraft nach Häberle [Häb95] zu bestimmen. Bei einer treibenden Seilscheibe hingegen müssen die wirkenden Kräfte, die vom Drahtseil ausgehen, analysiert werden.

LITERATUR

- [DIN94] DIN 22410: *Förderseilscheiben für Rundseile*, Berlin, 1994
- [Häb95] Häberle, Bernd: *Pressung zwischen Drahtseil und Seilscheibe*. Stuttgart: Universität, Diss., 1995, S. 11-49
- [Har07] Harzheim, Lothar: *Strukturoptimierung: Grundlagen und Anwendungen* Harri Deutsch; Auflage: 1., Aufl. (November 2007)
- [Kat12] Katkow, Artur: *Topologieoptimierung und dynamische Analyse von Seilscheiben mit Hilfe der Finite-Elemente-Methode*, Stuttgart: Universität, Diplomarbeit, 2012
- [MaRo73] Mancini, G., Rosetti, U.: *Sur l'analyse des contraintes et des déformations des câbles fléchis*. Milano, Italie : OIPEEC table ronde sur les tendances actuelles dans l'étude de l'endurance des câbles, Septembre 1973
- [Sch87] Schiffner, Gerhard: *Spannungen in laufenden Drahtseilen*. Stuttgart: Universität, Diss., 1987
- [Sch65] Schmidt, Karl: *Die sekundäre Zugbeanspruchung der Drahtseile bei Biegung*. Karlsruhe: Universität, Diss. In: Fortschritt-Berichte der VDI Zeitschrift, Reihe 13, Nr. 2, 1965.
- [Sch04] Schuhmacher, Axel: *Optimierung mechanischer Strukturen: Grundlagen und industrielle Anwendungen*. Springer; Auflage: 2005 (15. September 2004)
- [Wie75] Wiek, Lorious: *Tatsachen und ziffernmäßige Darstellung der Spannungen in Drahtseilen* (Teil 1-3). In: *Draht* 26 (1975) Nr. 6, S283-286, Nr. 8 S. 387-389, Nr. 10, S. 4-9