WIRE ROPE

TECHNOLOGY AACHEN



Das Drahtseil im 21. Jahrhundert

Das Drahtseil im 21. Jahrhundert

von Dipl.-Ing. Roland Verreet

Inhalt

1.	Das Albertseil	4
2.	Moderne Drahtseile	8
3.	Die Zukunft des Drahtseils	12
4.	Literatur	16

© 2013, 2018 Ingenieurbüro für Drahtseiltechnik Wire Rope Technology Aachen GmbH Titel und Cartoons: Rolf Bunse

Satz, Layout und Gestaltung: Benedikt Dolzer, Aachen

Nachdruck, auch teilweise, nur mit Genehmigung des Verfassers.

1. Das Albertseil

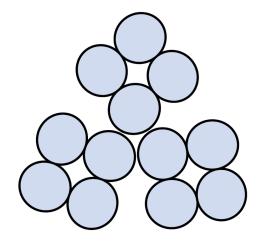
Im Jahr 1834 erfand Oberbergrat Albert das Drahtseil. Er ersetzte die Reihenschaltung von lasttragenden Elemente der Kette (bei der jedes Kettenglied die volle Last trägt) durch eine Parallelschaltung von lasttragenden Drähten (bei der jeder Draht nur einen kleinen Teil der Last trägt).

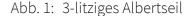
Diese redundante Anordnung der Seilelemente führte zu einem großen Zugewinn an Sicherheit: Während bei der Kette der Bruch nur eines einzigen Elementes zu einem Versagen des Hebemittels führte, war ein Drahtseil selbst dann noch betriebssicher, wenn jeder einzelne Draht, eventuell sogar mehrfach, gebrochen war.

Im Gegensatz zu modernen Drahtseilen, wo lediglich etwa 20% des tragenden Seilquerschnitts visuell inspiziert werden können, waren alle Drähte des ersten Drahtseils der Weltgeschichte (Machart 3 x 4 Drähte, Abb. 1) und auch alle Drähte des zweiten Albertseils (Machart 4 x 3 Drähte, Abb. 2) einer visuellen Inspektion zugänglich. Die Tatsache, dass alle Drähte sichtbar (und somit inspizierbar) waren, selbst wenn sie im Inneren des Seiles lagen, führte zu einem weiteren Zugewinn an Sicherheit.

Nachdem nachweislich Seile aus Naturfasern etwa 7000 Jahre lang nur im Kreuzschlag herstellt wurden (und auch heute noch so hergestellt werden), stellte Albert das erste Drahtseil der Weltgeschichte im Gleichschlag her. Diese Verseilart hatte den Vorteil, dass im Inneren seiner Drahtseile die Drähte unterschiedlicher Litzen genaudort, wo sie sich aufeinander abstützen, parallel zueinander verliefen.

Das Problem von frühzeitigen, nicht erkennbaren Drahtbrüchen an Überkreuzungsstellen im Seilinneren, welches die Drahtseilindustrie bis heute beschäftigt, hatte Albert bereits für sein erstes Drahtseil gelöst. Der Gleichschlag wird heute nach seinem Erfinder auch Albertschlag genannt.





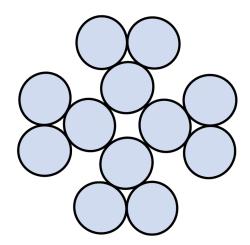


Abb. 2: 4-litziges Albertseil

Die Vorteile des Drahtseils gegenüber der Kette waren so überzeugend, dass sich das neue Hebemittel, nicht zuletzt aufgrund von Albert' s eigenen Schriften über Herstellung und Anwendung von Drahtseilen, sehr schnell um den Erdball verbreitete. So las zum Beispiel der deutsche Auswanderer und berühmte Brückenbauer Johann Röbling in einer deutschen Bergbauzeitschrift von Albert's Erfindung und begann sofort, in den USA Drahtseile herzustellen. Die Firma Roebling & Sons war bis zum Ende des Zweiten Weltkriegs die größte Drahtseilfabrik der Welt.

Die technologische Verbesserung des Drahtseils vollzog sich in den Folgejahren im Wesentlichen in den Vereinigten Staaten. 1884 erfand Tom Seale, der Direktor einer Cable Car in San Francisco, den Parallelschlag für die Herstellung mehrlagiger Litzen, und im Jahre 1922 erfanden Ingenieure von American Chain and Cable zwei noch heute gebräuchliche Verfahren zum Vorformen von Litzen. Im Zweiten Weltkrieg gewann das Drahtseil eine große strategische Bedeutung, sei es zum Heben oder Ziehen von Lasten, sei es für Bergepanzer oder zur Herstellung und Verankerung von U-Boot-Netzen. Ohne Kugellager und ohne Drahtseile konnte man einen Krieg nicht mehr gewinnen. Deshalb bombardierten die Flugzeuge der Alliierten bei ihren Angriffen auf Deutschland neben Kugellagerfabriken auch bevorzugt Fabriken zur Herstellung von Drahtseilen.

Die fast vollständige Zerstörung der deutschen Drahtseilwerke im Zweiten Weltkrieg sollte sich in den Folgejahren jedoch als Vorteil erweisen: Nach einer Phase des Wiederaufbaus besaß die deutsche Drahtseilindustrie den modernsten Maschinenpark zur Herstellung von Drahtseilen in Europa, und vielleicht sogar weltweit. Vielleicht sind gerade deshalb in den letzten Jahrzehnten wieder alle bahnbrechenden Verbesserungen des Drahtseils in Deutschland gemacht worden, wo dieses Produkt auch erfunden wurde.

Albert stellte seine Seile aus 12 Drähten her. Moderne Drahtseile bestehen aus etwa 42 bis über 1000 Drähten. Die 3- und 4-litzigen Albertseile hatten Durchmesser von etwa 16mm. 175 Jahre nach Albert werden Drahtseile in Durchmessern von unter 0,l mm bis zu Durchmessern von über 300 mm und Stückgewichten von 360t gefertigt. Als laufende Seile finden sie Verwendung als Hubseile für Krane, Aufzüge und Bergwerksanlagen, als Auslegerverstellseile, als Steuerseile sowie als Betätigungsseile für Fensterheber und Schiebedächer in Autos oder als Zugseile für Winden. Die Seile eines modernen Großkrans können in der Summe einige Kilometer lang sein (Abb. 3).

Als stehende Seile finden wir sie als Abspannseile von Kranen, als Tragseile von Brücken sowie als Führungsseile in Bergwerksschächten. Bei Seilbahnen dienen Drahtseile sogar als Fahrbahn. Eine weitere Verbreitung finden sie als Anschlagseile.

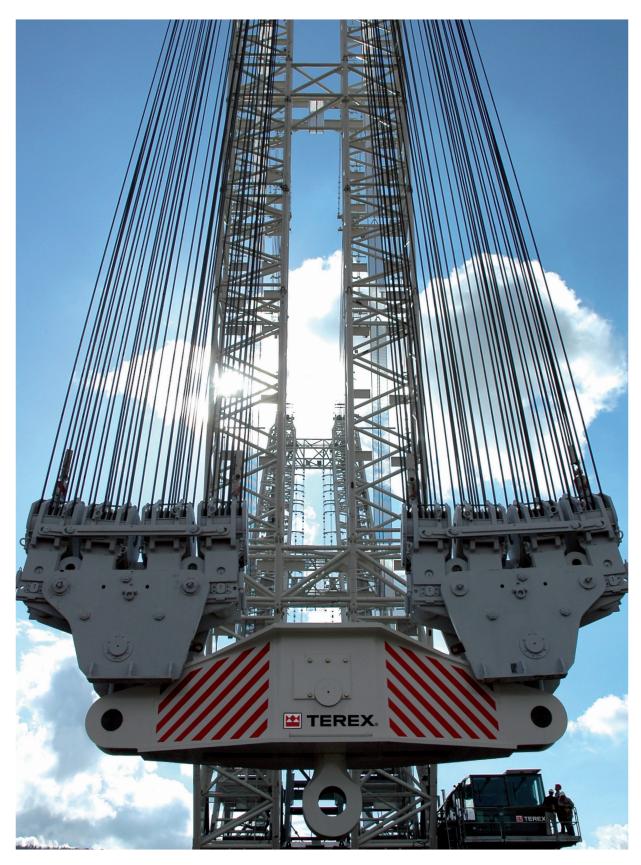


Abb. 3: Hubseile eines modernen Großkrans



Abb. 4: Das Drahtseil als dekoratives Element

Auch als dekoratives Element wird das Drahtseil immer häufiger eingesetzt (Abb. 4). In modernen Bauwerken machen sich Architekten die Tatsache zunutze, dass Drahtseile zum einen höchst regelmäßige und ästhetische Bauelemente sind, zum anderen aber auch hohe Zugkräfte übertragen können.

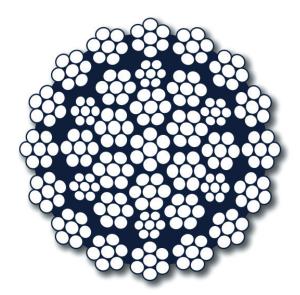
Im Jahre 2008 wurden allein in der Europäischen Gemeinschaft mehr als 170.000 t Drahtseile verkauft. Etwa 70.000 t Drahtseile wurden in der EU hergestellt, weitere 100.000 t wurden aus Nicht-EU-Ländern importiert.

2. Moderne Drahtseile

In den letzten Jahrzehnten hat das Drahtseil eine Reihe von Verbesserungen erfahren.

2.1. Drehungsarme oder drehungsfreie Drahtseile

Aufgrund der helixförmigen Anordung ihrer Litzen haben Drahtseile das Bestreben, sich unter Last aufzudrehen und zu verlängern. Um dies zu verhindern, wurden Drahtseile mit einer entgegengesetzt zu den Außenlitzen geschlagenen Stahleinlage entwickelt (Abb. 5). Bei korrekter Wahl der Seilgeometrie heben sich die Drehmomente von Außenlitzen und Stahleinlage gegenseitig auf, und das Seil verdreht nicht.



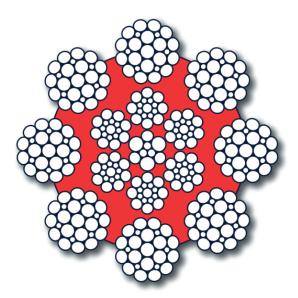


Abb. 5: Drehungsfreies Seil

Abb. 6: Drahtseil mit Kunststoffzwischenlage

2.2. Drahtseile mit Kunststoffzwischenlage

In den siebziger Jahren des vergangenen Jahrhunderts begann das Zeitalter des Kunststoffs. Auch die Hersteller von Drahtseilen wollten sich natürlich dieser Wunderwerkstoffe bedienen. Ein nahe liegender Gedanke war, die korrosionsanfälligen Seile durch eine Außenummantelung von Kunststoff gegen Korrosion zu schützen.

Dies führte aber dazu, dass äußere Drahtbrüche, das wichtigste Ablegekriterium für Drahtseile, nicht mehr erkannt wurden, und so wurde die Außenummantelung für laufende Drahtseile verboten. Deshalb beschränkte man sich darauf, nur die Stahleinlage zu ummanteln (Abb. 6).

Nun waren die Außendrähte wieder sichtbar, und man erzielte, zunächst völlig unbeabsichtigt, eine Reihe von weiteren Vorteilen: Die Seile mit Kunststoffzwischenlage erwiesen sich zum einen als sehr resistent gegen Korbbildungen (Abb. 7), und zum anderen verringerten sie die Gefahr von inneren Drahtbrüchen. Drahtseile mit Kunststoffzwischenlage gehören heute zum Sortiment jedes namhaften Drahtseilherstel-



Abb. 7: Korbbildung

2.3. Drahtseil mit verdichteten Litzen

Gegen Ende der siebziger Jahre des vorigen Jahrhunderts kamen die ersten Drahtseile mit verdichteten Litzen auf den Markt. Die Litzen werden zunächst mit einem größeren Durchmesser hergestellt und dann durch Ziehen, Walzen oder Hämmern auf den gewünschten Enddurchmesser verkleinert (Abb. 8). Seile mit verdichteten Litzen haben einen höheren Metallquerschnitt, eine höhere Flexibilität und bessere Auflageverhältnisse als Drahtseile aus unverdichteten Litzen.

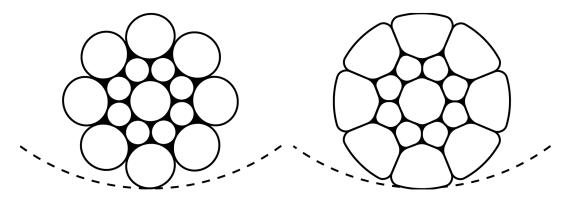


Abb. 8: Unverdichtete und verdichtete Litze

2.4. Gehämmerte Seile

Noch bessere Auflageverhältnisse und noch höhere Bruchkräfte erzielt man heute mit Drahtseilen, die zunächst in einem größeren Durchmesser hergestellt und dann durch Hämmern auf den gewünschten, kleineren Enddurchmesser gebracht werden. Durch den Hämmerprozess flachen sich die Außenlitzen ab, und das Drahtseil erhält eine nahezu zylindrische Oberfläche (Abb. 9).

Aufgrund ihrer günstigen Auflageverhältnisse bewähren sich gehämmerte Drahtseileinsbesondere auf mehrlagig bewickelten Seiltrommeln.

2.5. Rapid Prototyping bei Drahtseilen

Ein Drahtseil muss heute nicht mehr aus Drähten aufgebaut werden. Wir sind heute in der Lage, kurze Seillängen für Versuche mit Hilfe des Rapid Prototyping aus Metallpulver (Titan oder Edelstahl) zu sintern. Die Seilendverbindung wird hier praktischerweise nicht nachträglich angebracht, sondern bei der Seilherstellung ohne Störung des Seilverbunds direkt an das Drahtseil angesintert.

2.6. Drahtseile aus Formdrähten

Oberbergrat Albert hat seine Drahtseile aus Runddrähten hergestellt, wie dies auch heute noch überwiegend üblich ist. Für besondere Anwendungszwecke, z. B. für die Verwendung als Tragseil bei Seilbahnen, werden jedoch heute auch Drahtseile aus Formdrähten hergestellt (Abb. 10).

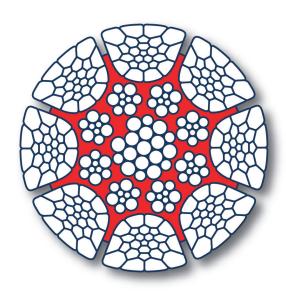


Abb. 9: Gehämmertes Seil

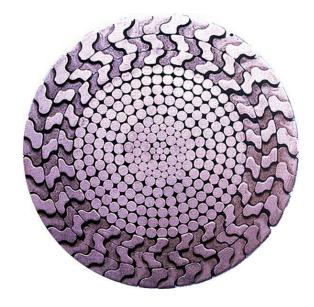


Abb. 10: Vollverschlossenes Seil aus Formdrähten

2.7. Drahtseil mit variablen Schlaglängen

Oberbergrat Albert hat seine ersten Drahtseile noch von Hand herstellen lassen. Hierbei stellte die Verseilung mit gleichmäßiger Schlaglänge ein besonderes Problem dar. Sehr schnell ging man deshalb dazu über, Drahtseile maschinell mit konstanter Schlaglänge entlang der Seillänge herzustellen.

Wenn man ein solches Drahtseil mit konstanter Schlaglänge mit gegen Verdrehen gesicherten Enden in einen Schacht einbaut, wirkt oben eine größere Seilkraft (Nutzlast + Seilgewicht) als unten (nur Nutzlast). Hierdurch ergeben sich Drehmoment-unterschiede entlang der Seillänge, und in der Folge drehen die Seile oben auf und unten zu. Als Folge vergrößert sich die Seilschlaglänge oben und verkleinert sich die Seilschlaglänge unten so lange, bis entlang der Seillänge überall das gleiche Drehmoment wirkt. Diese Verdrehung bewirkt jedoch Veränderungen der Draht- und Litzenlängen, die sich im Einsatz als nachteilig erweisen.

Seit einigen Jahren werden in Schächten der Ukraine, Australiens und Südafrikas mit Erfolg Drahtseile eingesetzt, die bereits im Werk so hergestellt werden, dass sich ihre Schlaglänge entlang der Seillänge stetig verändert. Wenn ein solches Seil vertikal im Schacht montiert wird, hat es bereits die Geometrie, die ein konstantes Seildrehmoment entlang der Seillänge bewirkt, und muss sich nicht mehr verdrehen. So werden die durch die Seilverdrehung erzeugten Schäden erfolgreich vermieden.

2.8. Flachseile, insbesondere für Aufzüge

Die Biegespannung des Drahtseils und die Pressung auf der Seilscheibe sind abhängig vom Verhältnis D/d (Scheibendurchmesser zu Seildurchmesser). Deshalb werden im Kran- und Anlagenbau Mindestwerte für das Verhältnis D/d festgeschrieben. Eine Erhöhung des Seildurchmessers führt so automatisch zu einer deutlichen Erhöhung der Scheiben- und Trommeldurchmesser.

Um die Scheiben- und Trommeldurchmesser dennoch genügend klein ausführen zu können, ist man dazu übergegangen, ein vergleichsweise dickes Drahtseil in mehrere parallel nebeneinander angeordnete Drahtseile entsprechend kleineren Durchmessers aufzuteilen. Solche Seile sind zum Beispiel als Flachunterseile im Bergbau seit langem bekannt.

In den letzen Jahren ist man insbesondere im Aufzugbereich dazu übergegangen, derartig nebeneinander angeordnete Drahtseile in einer Matrix aus Kautschuk oder Kunststoff einzubetten (Abb. 11). Durch den Überzug werden die Drahtseile in ihrer Lage relativ zueinander fixiert und gegen die Umgebung geschützt. Der Werkstoff der Matrix verschafft dem Hebemittel den bei Treibscheibenantrieben gewünschten, erhöhten Reibwert.

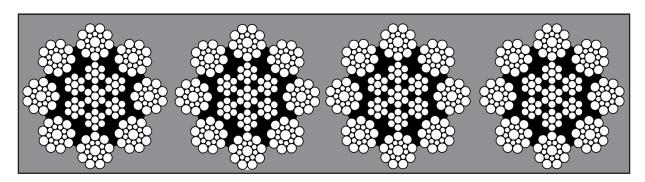


Abb. 11: Flachseil

3. Die Zukunft des Drahtseils

Als der Autor vor 34 Jahren als junger Ingenieur seine erste Arbeitsstelle bei einem Drahtseilhersteller antrat, warnten ihn seine Studienkollegen: Es gäbe nun Wunderwerkstoffe wie Kevlar. Diese hätten Zugfestigkeiten höher als gezogener Stahldraht, seien aber erheblich leichter. Sie korrodierten nicht und hätten eine verblüffend gute Ermüdungsfestigkeit. Stahlseile würden in den nächsten Jahren so schnell verschwinden wie die Keule nach der Erfindung des Schießpulvers, und der Autor müsse sich dann nach einem neuen Arbeitgeber umsehen.

Nun, irren ist menschlich. In den Folgejahren kamen weitere Wunderwerkstoffe hinzu. Dennoch wurden im Jahr 2008 weltweit mehr Stahldrahtseile produziert als jemals zuvor.

Das Drahtseil hat nach 175 Jahren einen gut erforschten Versagensmechanismus und ist ein vielseitiges und zuverlässiges Maschinenelement. Moderne Drahtseile erzielen hohe Lebensdauern und zeigen ihre Ablegereife in der Regel sicher an.

Oberbergrat Albert selbst begann als erster, Ermüdungsversuche an Drahtseilen und Ketten durchzuführen, und er gilt heute zu Recht als Begründer der Ermüdungsforschung.

Dank seiner Arbeit und der seiner Nachfolger (z. B. der Professoren Wörnle, Müller und Feyrer) können wir heute die zu erwartende Lebensdauer eines Drahtseils sowohl unter Zugschwellbeanspruchung als auch unter Biegewechselbeanspruchung mit guter Genauigkeit voraussagen. Diese Prognosemöglichkeit erlaubt es uns zum Beispiel, für einen gegebenen Seiltrieb und für ein vorgegebenes Belastungsspektrum einen optimalen Seildurchmesser zu bestimmen (Abb. 12), für den die Seillebensdauer maximal wird.

Seile mit einem kleineren als dem optimalen Durchmesser würden vorzeitig aufgrund der für sie zu hohen Stranglast versagen, Seile mit einem größeren als dem optimalen Durchmesser würden vorzeitig aufgrund des für sie zu ungünstigen Verhältnisses D/d (Scheibendurchmesser zu Seildurchmesser) versagen.

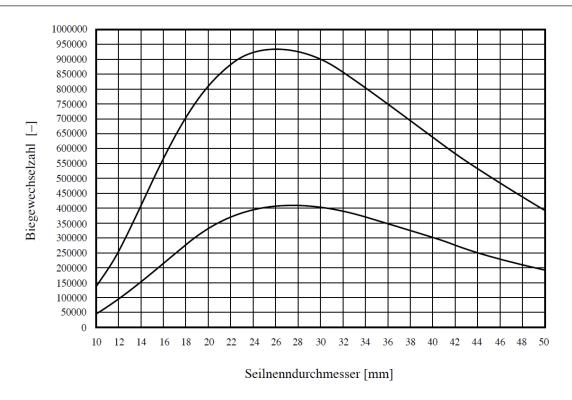


Abb. 12: Biegewechselzahl bis Ablegereife (untere Kurve) und bis Bruch (obere Kurve) in Abhängigkeit vom Seilnenndurchmesser. Der optimale Seildurchmesser beträgt 27mm, der wirtschaftlichste Seildurchmesser beträgt etwa 25mm.

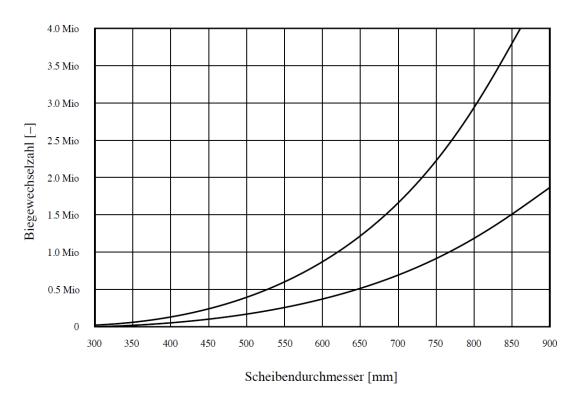


Abb. 13: Biegewechselzahl bis Ablegereife (untere Kurve) und bis Bruch (obere Kurve) in Abhängigkeit vom Seilscheibendurchmesser.

Auch können wir leicht berechnen, um wie viel wir den Scheibendurchmesser im Seiltrieb erhöhen müssen, um die Seillebensdauer um einen gewünschten Prozentsatz zu erhöhen (Abb. 13).

Dennoch ist nicht zu übersehen, dass die Wunderwerkstoffe heute mehr Akzeptanz erfahren als vor über 30 Jahren. Aber immer noch sind einige Probleme der Seile aus hochfesten Fasern nicht gelöst. Insbesondere die sichere Erkennung der Ablegereife von Kunstfaserseilen stellt immer noch ein Problem dar.

Bei sehr großen Seillängen, zum Beispiel im Untertagebergbau oder bei Tiefseeanwendungen, wo das Seilgewicht einen sehr hohen Anteil an der Gesamtlast des Seiles hat, hätten Seile aus leichten, hochfesten Fasern Stahlseilen gegenüber große Vorteile. Aber gerade in diesen Anwendungen müssen die Seile oft mehrlagig gewickelt werden, und dafür ist die radiale Steifigkeit der modernen Faserseile nicht ausreichend: Die Seile verformen sich zu stark auf der Seiltrommel oder ziehen sich in tiefere Lagen hinein.

Einen Ausweg aus diesem Dilemma könnten Verbundseile aus Seildraht und hochfesten Fasern sein, die die Eigenschaften der bewährten Stahlseile mit den Vorteilen der neuen Werkstoffe kombinieren.

3.1. Hybridseile

Hybridseile haben eine äußere Lage von Stahllitzen und ein Kernseil aus hochfesten Fasern (Abb. 14 unten). Von außen unterscheiden sie sich nicht von einem Vollstahlseil (Abb. 14 oben).



Abb. 14: Vollstahlseil mit Kunststoffzwischenlage (oben) und Hybridseil (unten)

Die Bruchkraft und Ermüdungsfestigkeit eines Hybridseils sind so hoch wie die eines Vollstahlseils, aber das Gewicht ist wegen des leichteren Faserkerns je nach Machart um 25 % bis 50 % niedriger. Die radiale Stabilität ist fast so hoch wie die eines Vollstahlseils (womit das Spulproblem gelöst wäre), und die Ablegekriterien sind die gleichen wie bei "normalen" Drahtseilen. Das Entwicklungspotential des Drahtseils ist sicherlich noch nicht ausgereizt.

Aufgrund seiner hohen Lebensdauer, der guten Erkennbarkeit seiner Ablegereife, der hohen Widerstandsfähigkeit gegen mechanische Beschädigung und der 175- jährigen Erfahrung mit diesem Produkt wird das Drahtseil auch weiterhin ein wichtiges Maschinenelement bleiben. Die Geschichte des Drahtseils ist nach 175 Jahren noch nicht zu Ende.

4. Literatur

Feyrer, K: Drahtseile - Bemessung, Betrieb, Sicherheit,

Springer Verlag, ISBN 3-540-67829-8

Verreet, R: Diverse Schriften zu den angesprochenen Themen auf

www.seile.com

Ingenieurbüro für Fördertechnik

Dipl.-Ing. Roland Verreet

Grünenthaler Str. 40a • 52072 Aachen Tel.: 0241- 173147 • Fax: 0241- 12982

Mail: R.Verreet@t-online.de

www.seile.com